

¿Soy un mono?

¿Por qué la evolución es una teoría?

¿Qué es el ADN?

Todos los científicos aceptan la evolución?

¿Cómo empezó la vida?

uede uno creer en Dios y comprender la evolución?

A partir de la pregunta que da título al libro, Francisco J. Ayala desmenuza y divulga las líneas básicas y los fundamentos de la evolución, explica cómo funciona el proceso evolutivo y explica con claridad que la ciencia y la religión pueden no ser términos contradictorios.

«El profesor Ayala ha escrito un libro importante, una explicación lúcida de la teoría de la evolución y los temas que suscita. Revisita las abrumadoras evidencias, establece que la evolución es un hecho incontrovertible. Además ofrece razones convincentes que se deben tener en cuenta para entender que la teoría de la evolución no es enemiga de las creencias religiosas o un obstáculo para tener fe.»

HARRY FRANKFURT, autor de *On Bullshit* y *Sobre la verdad*.

10001318



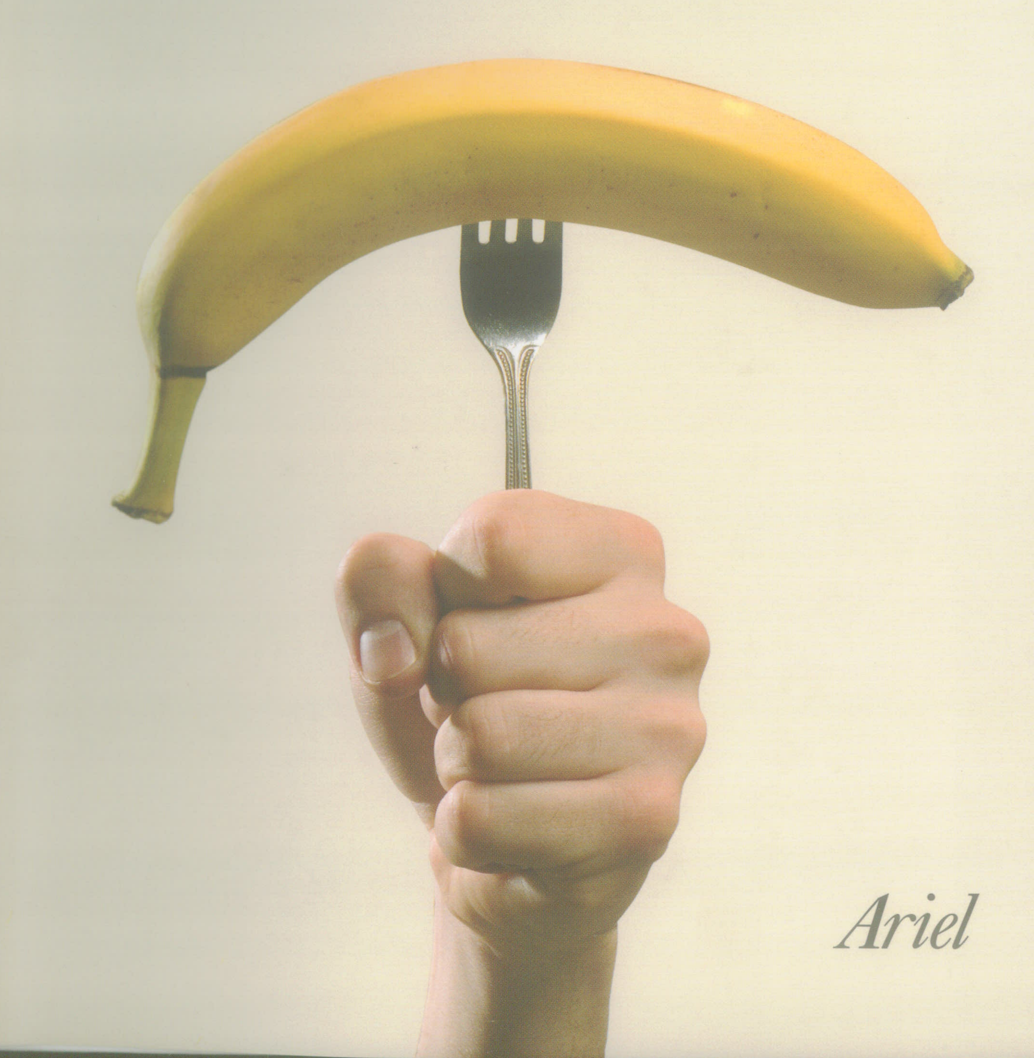
Ariel
www.ariel.es

FRANCISCO J. AYALA
¿SOY UN MONO?
Ariel

FRANCISCO J. AYALA

¿SOY UN MONO?

Una obra que se lee en un día
y da respuestas para toda una vida.



Ariel

Francisco J. Ayala

¿Soy un mono?

Ariel

1.ª edición: febrero de 2011

Avda. Diagonal, 662-664 - 08034 Barcelona

Editorial Ariel es un sello editorial de Planeta S. A.

ISBN 978-84-344-6962-4

Depósito legal: M. 53.737 - 2010

Impreso y encuadernado en España por
Brosmac, S. L.

El papel utilizado para la impresión de este libro
es cien por cien libre de cloro
y está calificado como **papel ecológico**.

Para Hana, con cariño

Índice

Agradecimientos

Estoy extremadamente agradecido a Vincent J. Burke, editor principal de la Johns Hopkins University Press. Fue él quien concibió este libro y me invitó a escribirlo. Ha sido un placer trabajar con Vince, de quien recibí siempre buenos consejos, y siempre con amabilidad. También fueron muy atentos y amables otros miembros de J. H. U. Press, concretamente la directora editorial, Julie McCarthy, la asistente de compras, Jennifer E. Malat, y el excelente corrector de estilo, George Roupe. Mi más sentido agradecimiento a todos ellos. Hicieron de la escritura de este breve libro una experiencia de lo más agradable. Quiero expresar mi enorme deuda hacia Denise Chilcote por la preparación del manuscrito. Durante los veintitrés años que lleva trabajando como mi asistente ejecutiva, siempre ha respondido a todo lo que ha sido o podido ser necesario. Aún estoy asombrado por la enorme cantidad de trabajo que es capaz de realizar. Su dedicación y perfeccionismo han supuesto un enorme beneficio para mí.

Introducción

DARWIN COMPLETÓ LA revolución científica al extender al mundo de los seres vivos la noción de que el funcionamiento del universo puede explicarse a través de leyes naturales. Aportó pruebas convincentes de la evolución de los organismos. Sin embargo, lo más importante es que Darwin descubrió la selección natural, el proceso que explica el *diseño* de los organismos. Las adaptaciones y la diversidad de los seres vivos, el origen de especies nuevas y complejas, e incluso el origen de la humanidad, pudieron entonces explicarse mediante un proceso organizado de cambio controlado por leyes naturales.

La revolución científica que tuvo lugar en los siglos XVI y XVII introdujo el concepto del universo como materia en movimiento gobernada por leyes naturales. Los descubrimientos de Copérnico, Galileo, Newton y otros científicos provocaron una revolución fundamental, es decir, un compromiso con el postulado de que el universo obedece a leyes inmanentes que pueden explicar los fenómenos naturales. Sin embargo, la diversidad y

las adaptaciones de los seres vivos habían sido excluidas de la ciencia.

El diseño funcional de los organismos parecía requerir un Diseñador que pudiera justificar por qué los animales tienen ojos para ver, alas para volar, aletas para nadar, o por qué las plantas tienen clorofila para la fotosíntesis. El concepto del universo que tenía la humanidad divergía en sentidos opuestos. Por un lado, las explicaciones científicas derivadas de leyes naturales controlaban el mundo de la materia inanimada, tanto en la tierra como en el cielo. Por otro lado, las explicaciones sobrenaturales, que dependían de acciones insondables de un Creador, o de otras entidades de fuera de este mundo, daban cuenta del origen y la configuración de las criaturas vivientes, las realidades más diversificadas, complejas e interesantes del mundo.

Gracias al genio de Darwin se resolvió esta dicotomía conceptual. Su descubrimiento de la selección natural completó la revolución científica al trazar en la biología la noción de la naturaleza como un legítimo sistema de materia en movimiento que la razón humana puede explicar sin recurrir a entidades sobrenaturales. La selección natural es una de las más grandes ideas que se han tenido nunca, y Darwin es uno de los científicos más influyentes de todos los tiempos.

La teoría de la evolución biológica es el concepto central que organiza la biología moderna. La evolución explica científicamente por qué hay tantas clases de organismos diferentes y da cuenta de las semejanzas y diferencias entre ellos. Explica el surgimiento de los seres humanos en la tierra y revela las conexiones biológicas con otros seres vivos. Proporciona un entendimiento de la evolución constante de las bacterias, los virus y otros gérmenes, y permite el desarrollo de vías efectivas para protegernos contra las enfermedades que causan. El conocimiento de la evolución ha hecho posibles los avances en agricultura, medicina y biotecnología.

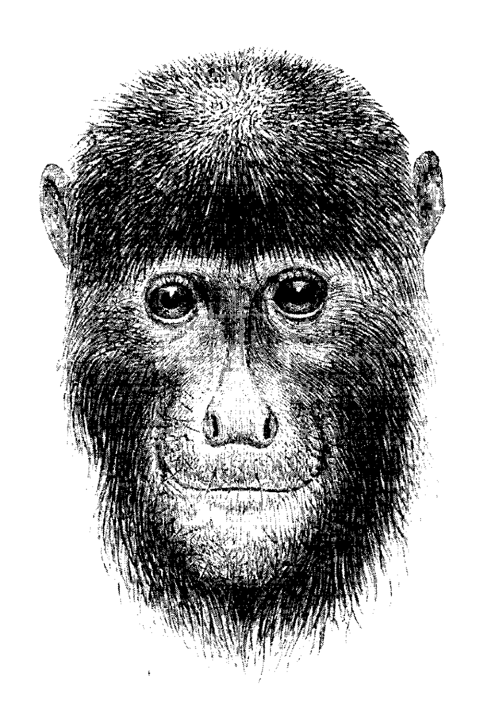
Muchas personas (no sólo en Estados Unidos, aunque allí se encuentre el mayor foco) consideran controvertida la teoría de la evolución. A mí, como genetista y evolucionista que ha dedicado su vida al estudio de la evidencia y los procesos que explican la evolución, esta percepción me resulta sorprendente. Está más allá de toda duda que los organismos, incluidos los humanos, han evolucionado a partir de ancestros muy diferentes a ellos. Los científicos aceptan la evolución de los organismos con el mismo grado de confianza con que aceptan otras teorías científicas totalmente comprobadas, como la traslación de la Tierra alrededor del Sol, la expansión de las galaxias, la teoría atómica o la teoría genética de la herencia biológica.

¿Soy un mono? pretende explicar algunos principios centrales de la teoría de la evolución para responder a las preguntas que surgen en la mente de las personas que están vagamente familiarizadas con este concepto. Ante todo hay que aclarar dos aspectos. El primero, que la ciencia es un medio muy eficaz de conocimiento

del mundo, pero no el único. El conocimiento procede también de otras fuentes como la experiencia basada en el sentido común, la literatura imaginativa, la experiencia musical y artística, la reflexión filosófica y, para la gente de fe, la religión y la revelación.

El segundo, al que sólo he dedicado el último capítulo de este libro, está relacionado con el primero. La ciencia y la religión no tienen por qué estar en contradicción. En realidad, si se comprenden de modo correcto, no pueden contradecirse porque se ocupan de asuntos diferentes. Sin embargo, a pesar de su éxito y de abarcar temas universales, la perspectiva científica del mundo resulta inevitablemente incompleta. Las cuestiones sobre el valor y el significado se quedan fuera del ámbito de la ciencia. Para entender la finalidad y el significado de la vida, así como todo lo que se refiere a la moral y los valores religiosos, tenemos que mirar en otra dirección. Para muchas personas, estas cuestiones son muy importantes, más incluso que la ciencia *per se.*





¿Soy un mono?

SOY UN PRIMATE. Los monos son primates, pero los humanos no son monos. Los primates incluyen a los monos, a los simios y a los humanos. Los humanos están más cerca en su linaje de los simios que de los monos. Por decirlo de otra manera, los simios son nuestros primos hermanos, mientras que los monos son nuestros primos segundos o terceros. Dentro de los simios, estamos más cerca de los chimpancés, más lejos de los gorilas y mucho más lejos de los orangutanes. El linaje humano se separó del linaje del chimpancé hace unos 6 o 7 millones de años. Hemos logrado este conocimiento por tres vías: comparando primates vivos, incluidos los humanos, unos con otros; mediante el descubrimiento y la investigación de restos fósiles de primates que vivieron en el pasado; y comparando sus respectivos ADN, proteínas y otras moléculas. El ADN y las proteínas contienen la mejor información sobre la proximidad de parentesco entre nosotros y los primates, y entre ellos mismos. Sin embargo, hay que estudiar los fósiles para saber cómo cambió el linaje humano a través del tiempo, haciendo que nuestros ancestros fueran adoptando una forma cada vez más humana.

La teoría de la evolución de Darwin afirmó que los humanos y los simios compartían ancestros comunes que no eran humanos. Sus contemporáneos se preguntaban dónde estaba el *eslabón perdido*, el organismo intermedio entre los simios y los humanos. En 1859, Darwin publicó su libro más conocido: *El origen de las especies*; en 1871, publicó *El origen del hombre*, donde extendía la teoría de la evolución a los hombres. Murió en 1882. Los primates que fueron ancestros del hombre, después de que nuestro linaje se separara del chimpancé, se llaman homínidos. En la época en que Darwin murió no se conocían fósiles homínidos de ancestros del hombre moderno, aunque él estaba convencido de que se acabarían encontrando. El primer fósil homínido fue hallado en 1889 por un físico holandés, Eugène Dubois, en la isla de Java. Se trataba de un fémur y un pequeño cráneo. Dubois, que era un experto en anatomía humana, supo que esos fósiles pertenecieron a un individuo bipédico; el fémur era muy similar al de un humano moderno. Sin embargo, la capacidad del pequeño cráneo era de unos 850 cm^3 (podría sostener un cerebro que pesase menos de un kilo; un kilo son 1 000 g, equivalentes a 454 cm^3); el cráneo de un humano moderno es de unos 1 300 cm^3 (con un cerebro de más o menos kilo y medio). El fósil descubierto por Dubois pertenecía a un individuo que vivió hace unos 1,8 millones de años y que ahora clasificamos como *Homo erectus*. Nuestra propia especie se denomina *Homo sapiens*.

El eslabón perdido ya no está perdido. El fósil de Java fue el primero, pero se han descubierto cientos de restos fósiles pertenecientes a cientos de individuos homínidos, en los siglos XX y XXI, en África, Asia y Europa, y siguen descubriéndose a un ritmo acelerado. Estos fósiles han sido estudiados y datados mediante métodos radiométricos, entre otros. Hay fósiles homínidos que cuando se comparan con los humanos, o entre ellos, son muy diferentes y se clasifican en distintas especies. El registro de fósiles homínidos pertenecientes a épocas distintas nos muestra que hubo muchos cambios en el linaje de los humanos modernos a través del tiempo. Uno de los cambios fue el aumento del tamaño del cuerpo; otro, el aumento de la capacidad craneal (y, por tanto, el tamaño del cerebro). A veces, los nombres de las especies resultan exóticos porque en muchas ocasiones aluden al lugar en que se encontraron los fósiles o a sus características morfológicas, y en otras ocasiones al capricho de sus descubridores.

El fósil homínido más antiguo que se conoce tiene 6 o 7 millones de años, procede de África y es conocido con los nombres de *Sahelanthropus* y *Orrorin*. Su anatomía indica que en su mayoría eran bipédicos, cuando estaban sobre el suelo, pero tenían cerebros muy pequeños. El *Ardipithecus* vivió hace unos 5,5 millones de años, también en África. Muchos de los restos fósiles de varios orígenes africanos reciben el nombre de *Australopithecus*, un homínido que apareció hace unos 4 millones de años. El *Australopithecus* tenía la postura

recta de los humanos, pero una capacidad craneal de aproximadamente medio kilogramo, comparable a la de un gorila o un chimpancé y un tercio de la capacidad del hombre moderno. La calavera del *Australopithecus* exhibe una mezcla entre simio y las características humanas; una frente baja y una cara larga como el simio, pero dientes proporcionados como los de los humanos. Otros homínidos tempranos, en parte contemporáneos del *Australopithecus*, son el *Kenyanthropus* y el *Paranthropus*. Ambos presentaban cerebros relativamente pequeños, aunque algunas especies del *Paranthropus* tenían cuerpos más grandes. El *Paranthropus* representa una rama aparte de un linaje homínido que se extinguió.

Los homínidos clasificados como *Homo habilis* son mucho más similares a nosotros; son las primeras especies clasificadas en el mismo género que nosotros: *Homo*. Los individuos *Homo habilis* fueron los primeros en fabricar las herramientas de piedra más simples, y por eso recibieron el nombre de *habilis* («habilidad» o «destreza» en latín). Tenían una capacidad craneal de unos 600 cm³, mayor que la de los primeros homínidos, pero menor que la mitad del tamaño de un cerebro humano moderno. El *Homo habilis* vivió en el África tropical hace de 1,5 a 2,5 millones de años. En el *Homo habilis* podemos ver el modesto comienzo de la tecnología humana.

Al *Homo habilis* lo sucedió el *Homo erectus*, que evolucionó en África hace unos 1,8 millones de años. Tenía una

capacidad craneal de 800 a 1 100 cm³ (de menos de un kilo a poco más de un kilo) y fabricaba herramientas más avanzadas que las del *Homo habilis*. Hay que destacar dos aspectos particulares del *Homo erectus*. Uno es que las especies pervivieron (con relativamente pocos cambios morfológicos, en varias épocas y lugares) durante mucho tiempo, desde hace 1,8 millones de años hasta hace aproximadamente 400 000 años. El segundo rasgo distintivo de los homínidos *Homo erectus* es que fueron los primeros nómadas intercontinentales. Poco después de su aparición en África, se extendieron hacia Europa y Asia, llegando hasta el norte de China e Indonesia (donde Dubois encontró el primer fósil homínido) hace de 1,6 a 1,8 millones de años, y probablemente pervivieron hasta hace 250 000 años.

Después del *Homo erectus* surgieron el *Homo neanderthalensis* y el *Homo sapiens*, nuestra especie. Muchos fósiles del *Homo neanderthalensis* (el hombre de Neandertal) fueron descubiertos en Europa, donde aparecieron por primera vez hace unos 200 000 años y se extinguieron hace 30 000. Los fósiles más recientes del *Homo neanderthalensis* se encontraron en España, donde parece que tuvieron su última morada. Los Neandertales tenían el cerebro grande, muy semejante al nuestro, y sus cuerpos también se parecían a los nuestros pero más fornida.

Es probable que la evolución del *Homo erectus* al *Homo sapiens* empezara hace unos 400 000 años, en la época en que se hallaron fósiles considerados como formas

arcaicas del *Homo sapiens.* Desde el punto de vista anatómico, los humanos modernos evolucionaron en África hace unos 200 000 o 150 000 años hasta finalmente colonizar el resto del mundo, sustituyendo a los otros homínidos. El *Homo erectus* que primero colonizó Asia y Europa no dejó descendientes directos. (Con la posible excepción del *Homo floresiensis,* unos minúsculos homínidos cuyos restos fósiles fueron descubiertos en 2004 en la isla de Flores, en Indonesia, en donde vivieron hace entre 12 000 y 18 000 años. Pudieron ser descendientes directos del *Homo erectus* asiático, pero aún se sigue investigando al respecto.)

El moderno *Homo sapiens* colonizó los continentes del mundo hace relativamente poco tiempo: el sudeste asiático y la región que ahora es China, hace 60 000 años, y Australia, poco después; Europa hace sólo 35 000 años; América hace unos 15 000 años, por colonizadores procedentes de Siberia. Por tanto, la diferenciación étnica entre las poblaciones humanas es bastante reciente y es resultado de una evolución divergente entre poblaciones separadas geográficamente durante los pasados 60 000 años.

El Proyecto Genoma Humano de Estados Unidos se inició en 1989 y se fundó a través de dos entidades: el Instituto Nacional de la Salud y el Departamento de Energía. (Poco después, en Estados Unidos se inició una empresa privada, llamada Celera Genomics, pero enseguida se asoció al proyecto patrocinado por el Gobierno tras conseguir, de forma independiente, los

mismos resultados.) El objetivo era encontrar la secuencia completa de un genoma humano en un plazo de quince años y por un coste aproximado de tres mil millones de dólares (lo que venía a ser un dólar por cada letra de ADN). El boceto de la secuencia del genoma se completó en el año 2001, antes de lo previsto. Y en el año 2003 se finalizó el Proyecto Genoma Humano.

La obtención de la secuencia de ADN de un genoma humano fue un gran logro tecnológico. Como se indica en el capítulo 3, si quisiéramos imprimir los tres mil millones de secuencias de nucleótidos que hay en el genoma humano se necesitarían miles de tomos con miles de páginas cada uno. La ordenación de este enorme genoma se consiguió gracias al desarrollo de nuevas tecnologías que ahora hacen más simple —relativamente hablando— la ordenación de genomas de tal tamaño. En los últimos años se han ordenado los genomas del ADN de algunos individuos humanos por sólo 100 000 dólares (muy poco comparado con los tres mil millones de dólares para la ordenación del primer genoma humano), y sólo se tardó alrededor de un mes en lugar de unos catorce años.

Ahora se han completado las secuencias de genomas del ADN de muchas especies, como, por ejemplo, la del chimpancé, que fue publicada por primera vez el 1 de septiembre de 2005. Se han hecho comparaciones entre los dos genomas con la intención de comprender lo que nos distingue como humanos a nivel genético. Para

muchos fue una sorpresa descubrir que, en las regiones del genoma compartidas por humanos y chimpancés, las dos especies son idénticas en un 99 por ciento. Esta diferencia puede parecer muy pequeña o muy grande, depende de cómo se mire: un 1 por ciento del total parece muy poco, pero supondría una diferencia de treinta millones de letras del ADN respecto a los tres mil millones que componen cada genoma.

Cuando comparamos los genomas con más detalle, descubrimos que el 29 por ciento de las enzimas, y otras proteínas codificadas por los genes, son idénticas en ambas especies. De los cientos de aminoácidos que componen cada proteína, el 70 por ciento de las proteínas no idénticas sólo difieren entre humanos y chimpancés en un promedio de dos aminoácidos. Si tenemos en cuenta los segmentos de ADN encontrados en una especie y no en la otra, los dos genomas son idénticos sólo en un 96 por ciento. Esto significa que una gran cantidad de material genético (alrededor del 3 por ciento o unos noventa millones de letras de ADN) se ha insertado o eliminado desde que los humanos y los chimpancés iniciaron caminos evolutivos separados, hace de 6 a 7 millones de años. La mayoría de este ADN no contiene genes que codifiquen proteínas.

Gracias a la comparación entre los dos genomas hemos conocido el índice de evolución de genes concretos en las dos especies. Por un lado, se observó que los genes activos en el cerebro han cambiado más en el linaje humano que en el linaje del chimpancé. Se han identificado un total de 585 genes, incluidos los genes implicados en la resistencia a la malaria y la tuberculosis, los cuales evolucionan más rápido en los humanos que en los chimpancés. (Hay que destacar que la malaria es una enfermedad mucho más grave en los humanos que en los chimpancés.) Parece que hay varias regiones del genoma humano que contienen genes beneficiosos que han evolucionado rápidamente en los últimos 250 000 años. Una región contiene el gen *FOXP2*, implicado en el desarrollo del habla (comentado en el capítulo 3).

Ahora conocemos algunos rasgos básicos que contribuyen a la distinción humana: un cerebro de mayor tamaño y el índice acelerado de evolución de algunos genes, como los que están implicados en el habla humana. Aunque este conocimiento es de gran importancia, aún nos queda mucho para saber qué nos distingue como humanos a través de los cambios genéticos.

En una o dos décadas, cuando se amplíen las comparaciones entre el genoma humano y el del chimpancé, y se realicen investigaciones experimentales de las funciones asociadas a genes significativos, podremos avanzar considerablemente en la comprensión de lo que nos distingue como humanos. Los rasgos que nos distinguen como humanos comenzaron a desarrollarse muy temprano, mucho antes del nacimiento, a medida que la información lineal codificada en el genoma se iba expresando progresivamente en un individuo de cuatro dimensiones (un individuo que cambia su configuración con el tiempo). De forma significativa, los

rasgos humanos más distintivos son los expresados en el cerebro, los que dan cuenta de la mente humana y su identidad.

Cuando exploramos el motivo de lo que nos hace específicamente humanos y tan diferentes del resto de los primates, hay que tener en cuenta que, a causa del avanzado desarrollo del cerebro humano, la evolución biológica se ha transcendido a sí misma y se ha iniciado un nuevo modo de evolución: la adaptación por la manipulación tecnológica del entorno. Los organismos se adaptan al medio a través de la selección natural, cambiando su configuración genética a lo largo de generaciones para satisfacer las exigencias del entorno. Los humanos (y sólo los humanos, al menos en un grado significativo) han desarrollado la capacidad de adaptarse a medios hostiles, modificando los entornos de acuerdo a las necesidades de sus genes. El descubrimiento del fuego y la fabricación de ropa y refugio permitió a los humanos expandirse desde las cálidas regiones tropicales y subtropicales del Antiguo Mundo (a las que estamos adaptados biológicamente) hasta el resto del planeta, con excepción de las heladas tierras de la Antártida. Los nómadas humanos no necesitaron esperar hasta que sus genes les confirieran una protección anatómica frente a las bajas temperaturas, por medio de pelaje o pieles que los cubrieran. Nosotros, los humanos, tampoco hemos perdido el tiempo esperando a tener alas o branquias; hemos conquistado el aire y los mares con aparatos ingeniosamente diseñados, como aviones o barcos. El cerebro humano (o, más bien, la

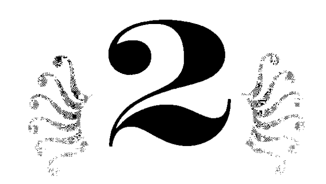
mente humana) ha hecho de la humanidad la especie viva con más éxito, en la mayoría de patrones significativos.

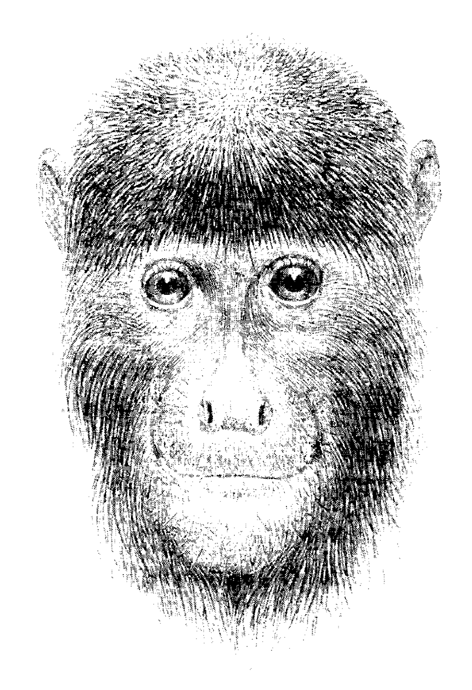
La neurobiología es una apasionante disciplina biológica que ha dado grandes pasos en las dos últimas décadas. Gracias al compromiso cada vez mayor de los recursos financieros y humanos en este campo, se ha alcanzado un índice de descubrimientos sin precedentes. Se ha aprendido mucho acerca de cómo la luz, el sonido, la temperatura, la resistencia y las impresiones químicas recibidas en nuestros órganos sensoriales activan la liberación de transmisores químicos y variedades eléctricas potenciales que llevan las señales, a través de los nervios, hasta el cerebro y otras partes del cuerpo. También se ha aprendido mucho sobre la manera en que los canales neuronales para la transmisión de información se refuerzan por su uso o son reemplazados cuando se han dañado; sobre qué neuronas o grupos de neuronas son responsables del proceso de información procedente de un órgano concreto o de un punto medioambiental; y sobre otras muchas cuestiones referentes a los procesos neuronales. Sin embargo, a pesar de todo este progreso, la neurobiología sigue siendo una disciplina muy joven, en estado de desarrollo teórico, comparable quizá con el de la genética a principios del siglo XX, cuando se descubrieron las leyes de la herencia genética de Mendel. Las cosas más importantes siguen cubiertas de misterio. No sabemos cómo se transforman los fenómenos físicos en experiencias mentales (los sentimientos y las sensaciones,

llamadas *qualia* por los filósofos, que aportan los elementos de la conciencia). Tampoco sabemos cómo, a partir de toda la diversidad de esas experiencias, surge la mente, esa realidad con propiedades unitarias como el libre albedrío y la conciencia de sí mismo que persisten a lo largo de la vida de un individuo.

No creo que los misterios de la mente sean indescifrables; más bien, son rompecabezas que los humanos pueden resolver con los métodos de la ciencia e iluminar con el análisis filosófico y la reflexión. Y apuesto a que, aproximadamente en el próximo medio siglo, se resolverán muchos de esos rompecabezas. Por tanto, iremos por el buen camino si prestamos atención al mandato «Conócete a ti mismo».

¿La evolución es únicamente una teoría? En el siguiente capítulo afirmo que la evolución es realmente una teoría. Pero se trata de una teoría en el sentido científico. No es una suposición o premonición, sino un corpus bien integrado de conocimiento científico apoyado por innumerables observaciones y experimentos. Por consiguiente, la evolución es tanto un hecho como una teoría.





¿Por qué la evolución es una teoría?

La evolución es una teoría y también un hecho. Esta doble afirmación puede parecer sorprendente, así que necesita una argumentación. Explicaré, en primer lugar, por qué la evolución es una teoría y, después, por qué es un hecho.

Cuando los científicos hablan de *teoría* de la evolución, utilizan la palabra de manera diferente al uso común. En el habla cotidiana, *teoría* suele significar «suposición» o «premonición» o «especulación». Alguien podría decir: «Tengo una teoría sobre dónde está escondido Osama Bin Laden». O podría expresar una idea como: «La gente que vive en los suburbios es más gorda que la gente que vive en la ciudad», y alguien podría responder: «Ésa es tu teoría, pero no tienes ninguna prueba de ello». Sin embargo, en ciencia, el apelativo *teoría* se utiliza en un sentido más apropiado para referirse a una explicación consolidada de algún aspecto del mundo natural que incluye observaciones, hechos, leyes, inferencias e hipótesis comprobadas. Aunque a veces los científicos utilizan el término de manera más informal,

cuando se refieren a intentos de explicaciones que carecen de un apoyo sustancial de pruebas, esas tentativas de explicación reciben el nombre más preciso de *hipótesis*. Es importante distinguir entre los usos informales de la palabra *teoría* y su uso para describir nociones como la evolución, que están respaldadas por evidencias abrumadoras.

Además de la teoría de la evolución, la ciencia tiene muchas otras teorías poderosas. La teoría heliocéntrica dice que la Tierra gira alrededor del Sol y no a la inversa. La teoría atómica dice que toda la materia está hecha de átomos. Y la teoría celular dice que todos los organismos vivos están formados por células. Según la teoría de la evolución, los organismos están relacionados por descendencia a partir de ancestros comunes. Las especies que comparten un ancestro reciente son más similares entre ellas que las especies cuyo último ancestro común es más remoto. Por su configuración y constitución genética, los humanos y los chimpancés son más similares entre ellos que a los mandriles, los elefantes o los canguros. Hay una multitud de especies porque los organismos cambian gradualmente de generación en generación y los diferentes linajes cambian de manera diferente como respuesta a entornos diferentes.

En lenguaje científico, la palabra *hecho*, como la palabra *teoría*, tiene un significado diferente al del lenguaje común. Un hecho científico es una observación confirmada una y otra vez, y que normalmente está más allá

de toda duda: por ejemplo, el hecho de que la sal común esté compuesta por cloro y sodio, o que el ADN esté formado por cuatro nucleótidos representados por las letras A, C, G y T. En el lenguaje común, la palabra *hecho* tiene un sentido más amplio que incluye el conocimiento basado en la observación directa o la experiencia, y que con frecuencia podría no estar confirmado más allá de toda duda.

Los científicos están de acuerdo en que el origen evolutivo de los animales y las plantas es una conclusión científica más allá de toda duda. La sitúan junto a conceptos establecidos como la redondez de la Tierra, su rotación alrededor del Sol o la composición atómica de la materia. En lenguaje común, que la evolución se ha producido, es un hecho, no sólo una teoría.

No obstante, puede ponerse una objeción. ¿Cómo puede afirmarse que la evolución ha ocurrido si nadie ha observado la evolución de las especies a partir de un ancestro común (por ejemplo, la evolución de humanos y chimpancés) y, menos aún, no se ha reproducido en un experimento? ¿No es cierto que la ciencia confía en la observación, reproducción y experimentación? En realidad es cierto, pero lo que observan y experimentan los científicos no son conceptos o conclusiones generales de teorías sino sus consecuencias.

La teoría heliocéntrica de Copérnico confirma que la Tierra gira alrededor del Sol. Los científicos aceptaron este hecho por las numerosas confirmaciones de sus

previsibles consecuencias, aunque nadie había observado a la Tierra girando alrededor del Sol. Hoy día nadie ha observado aún la rotación anual de nuestro planeta alrededor del Sol, ni siquiera los astronautas. Se aceptó que la materia está compuesta de una diversidad de átomos (aunque nadie había visto átomos) por las observaciones que lo corroboran, y los experimentos en física y química. En pocos años, los potentes microscopios han hecho posible examinar materiales con gran amplificación, y puede observarse la configuración externa de los presuntos átomos y moléculas. Con todo, aún se dista mucho de la observación directa de los átomos de la actual teoría atómica, con sus protones, electrones, neutrones y otras partículas. Puede que finalmente llegue el día en que los científicos observen directamente los átomos, su composición y configuración detallada, pero la teoría atómica de la composición de la materia no depende de tal observación. Tampoco la observación directa de la existencia de los átomos contribuiría mucho a la teoría atómica, que realmente abarca mucho más conocimiento que la simple afirmación de la existencia de los átomos.

La teoría de la evolución también depende de una enorme cantidad de observaciones y experimentos que confirman las consecuencias de la teoría. Por ejemplo, la afirmación de que los humanos y los chimpancés están más cerca entre ellos que de los mandriles conduce a la predicción de que el ADN de los humanos y el de los chimpancés es más parecido que el de los chimpancés y los mandriles. Para comprobar esta predicción,

los científicos seleccionan un gen concreto, examinan la estructura del ADN en cada especie, y así corroboran la inferencia. Los experimentos de este tipo se reproducen de varias maneras para estar más seguros de la conclusión. Y así se hace para miles de predicciones y deducciones entre toda clase de organismos.

La teoría de la evolución expone tres cuestiones diferentes pero relacionadas: 1*)* el hecho de la evolución, es decir, que los organismos están vinculados por un ascendente común; 2*)* la historia evolutiva, es decir, los detalles del momento en que los linajes se separaron unos de otros, y los cambios que se produjeron en cada linaje; 3*)* los mecanismos o procesos por los que ocurre el cambio evolutivo.

La primera cuestión es la más importante y la que está establecida con mayor certeza. Darwin reunió muchas pruebas en su apoyo, pero desde entonces se han seguido acumulando pruebas procedentes de todas las disciplinas biológicas. Actualmente, el origen evolutivo de los organismos es una conclusión científica establecida más allá de toda duda, provista del tipo de certeza que los científicos atribuyen a las teorías científicas consolidadas de la física, la astronomía, la química y la biología molecular. Cuando los biólogos dicen que la evolución es un *hecho,* como se ha dicho con anterioridad, se refieren a este grado de certeza más allá de toda duda; el origen evolutivo de los organismos es aceptado prácticamente por todo biólogo.

La teoría de la evolución va mucho más allá de la afirmación general de que los organismos evolucionan. La segunda y tercera cuestión, que buscan confirmar la historia evolutiva y explicar cómo y por qué se da la evolución, son objeto de investigación científica activa. Se han consolidado algunas conclusiones. Por ejemplo, una de ellas es que los chimpancés están más cerca de los humanos que de las especies de mandriles u otros monos. Otra conclusión es que la selección natural, el proceso postulado por Darwin, explica la configuración de rasgos adaptativos como el ojo humano y las alas de las aves. Muchas cuestiones no están tan claras, otras son hipotéticas y otras, como las características de los primeros organismos vivos y el momento concreto en que surgieron, siguen siendo ampliamente desconocidas, como se comenta en el capítulo 5.

A pesar de la incertidumbre respecto a estas cuestiones, no hay ninguna duda sobre el hecho de la evolución. Tampoco conocemos todos los detalles de la configuración del universo y el origen de las galaxias, y sin embargo no hay ninguna razón para dudar de la existencia de las galaxias o para desechar todo lo aprendido sobre sus características. La biología evolutiva es uno de los campos más activos de la investigación científica actual, y se siguen acumulando descubrimientos significativos, respaldados en gran medida por los avances en otras disciplinas biológicas.

El estudio de la evolución biológica ha transformado nuestra comprensión de la vida en el mundo. La evolución biológica explica tres aspectos fundamentales del mundo que nos rodea: las semejanzas entre los seres vivos, la diversidad de la vida y la adaptación de los organismos (el motivo por el que los animales tienen ojos para ver, alas para volar y branquias para respirar debajo del agua). La evolución explica la aparición de los humanos en la Tierra y pone de manifiesto nuestra relación con otros organismos vivos. En este momento, la evolución es el principio fundamental organizador que utilizan los biólogos para comprender el mundo. Como afirma Theodosius Dobzhansky, uno de los evolucionistas más importantes del siglo XX: «Nada en biología tiene sentido excepto a la luz de la evolución».

El aprendizaje de la evolución también tiene un sentido práctico. La biología moderna desmenuzó el código genético, desarrolló cultivos altamente productivos y proporcionó conocimientos para mejorar la asistencia sanitaria. La teoría de la evolución ha realizado grandes aportaciones a la sociedad. La evolución explica por qué muchos gérmenes han desarrollado resistencia a fármacos que en un primer momento eran efectivos y propone vías para enfrentarse a este grave y creciente problema sanitario. La biología evolutiva ha contribuido de forma importante a la agricultura al explicar las relaciones entre plantas silvestres y domésticas, y entre los animales y sus enemigos naturales. Es indispensable entender la evolución para establecer relaciones sostenibles con el entorno natural.

En un documento de la Academia Nacional de Ciencias y del Instituto de Medicina de Estados Unidos aparece un ejemplo de cómo se puede resolver una alerta de salud mundial gracias a la ayuda del conocimiento de la evolución:

> En China, a finales del año 2002, varios centenares de personas fueron víctimas de una forma grave de neumonía provocada por un agente infeccioso desconocido. Fue apodada «síndrome respiratorio agudo severo» o SARS, y se propagó rápidamente a Vietnam, Hong Kong y Canadá ocasionando centenares de muertes. En marzo del año 2003, un equipo de investigadores de la Universidad de California (San Francisco), recibió muestras de un virus aislado a partir de tejidos de un paciente con SARS. Utilizando una nueva tecnología conocida como chip de ADN (*DNA micro array*), los investigadores habían identificado el virus en veinticuatro horas [...] La comprensión de la evolución fue esencial en la identificación del virus SARS [...] Más aún, el conocimiento de la historia evolutiva del virus SARS proporcionó a los científicos información importante sobre la enfermedad, como la manera en que se propagó. (*Science, Evolution and Creationism*, 2008, p. 5.)

Darwin y otros biólogos del siglo XIX encontraron evidencias contundentes de la evolución biológica en el estudio comparativo de los organismos vivos (anatomía), en su distribución geográfica (biogeografía) y a partir de los restos fósiles de organismos extinguidos (paleontología). Desde la época de Darwin, la eviden-

cia de estas fuentes se ha vuelto más sólida y más completa y, al mismo tiempo, disciplinas biológicas más recientes, como la genética, la bioquímica, la ecología, el comportamiento animal (etología), la neurobiología y, sobre todo, la biología molecular, han aportado pruebas sólidas adicionales y detalladas corroboraciones.

Seguramente, Darwin habría estado encantado con la enorme acumulación de evidencia paleontológica. Por ejemplo, con el descubrimiento de fósiles de organismos intermedios entre los grupos principales, como el *Archaeopteryx*—intermedio entre reptiles (dinosaurios) y pájaros— y el *Tiktaalik*—intermedio entre el pez y los tetrápodos—, así como los numerosos fósiles y especies variadas de homínidos intermedios entre los simios y el *Homo sapiens*. Sin embargo, hay buenas razones para creer que Darwin habría estado más encantado e impresionado aún con las abrumadoras pruebas de la evolución y con la información precisa sobre la historia evolutiva aportada por la biología molecular, una fuente de pruebas y documentación de historia que Darwin jamás habría imaginado.

La biología molecular, una disciplina que surgió en la segunda mitad del siglo XX tras el descubrimiento, en 1953, de la estructura de doble hélice del ADN (el material hereditario), nos aporta las pruebas más sólidas respecto a la evolución de los organismos. En el siguiente capítulo se explica el ADN y cómo refuerza considerablemente la evidencia de la evolución.

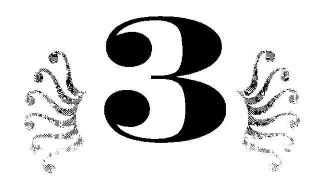
Antes de abordar estas cuestiones, debo hacer una observación relacionada con el tema de este capítulo. En ciencia, toda hipótesis y teoría es susceptible de ser rechazada o reemplazada por una nueva, al margen de todas las pruebas que se hayan acumulado en apoyo de dicha teoría. Por muchas que sean las pruebas que sirvan de apoyo a una teoría, siempre existe la posibilidad de que las razones por las que se han dado ciertos fenómenos observados y los resultados de algunos experimentos puedan proceder de alguna otra teoría que explique, no sólo los hechos conocidos sino también otros hechos inexplicados hasta el momento. Sin embargo, no parece muy probable que se vayan a rechazar o a reemplazar teorías tan ampliamente corroboradas, desde tantas disciplinas, como es el caso de la evolución de los organismos. Seguramente la teoría de la evolución se desarrollará y avanzará más. De la misma manera, parece del todo improbable que se rechace o se reemplace la teoría heliocéntrica o la composición molecular de la materia.

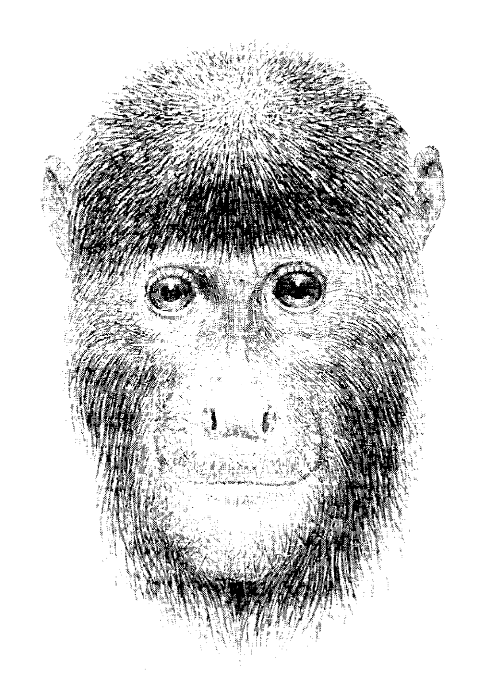
Echemos un vistazo ahora al ADN, la *base química de la vida,* como se la ha llamado, y a la evidencia de la evolución desde la biología molecular.



Antes de abordar estas cuestiones, debo hacer una observación relacionada con el tema de este capítulo. En ciencia, toda hipótesis y teoría es susceptible de ser rechazada o reemplazada por una nueva, al margen de todas las pruebas que se hayan acumulado en apoyo de dicha teoría. Por muchas que sean las pruebas que sirvan de apoyo a una teoría, siempre existe la posibilidad de que las razones por las que se han dado ciertos fenómenos observados y los resultados de algunos experimentos puedan proceder de alguna otra teoría que explique, no sólo los hechos conocidos sino también otros hechos inexplicados hasta el momento. Sin embargo, no parece muy probable que se vayan a rechazar o a reemplazar teorías tan ampliamente corroboradas, desde tantas disciplinas, como es el caso de la evolución de los organismos. Seguramente la teoría de la evolución se desarrollará y avanzará más. De la misma manera, parece del todo improbable que se rechace o se reemplace la teoría heliocéntrica o la composición molecular de la materia.

Echemos un vistazo ahora al ADN, la *base química de la vida,* como se la ha llamado, y a la evidencia de la evolución desde la biología molecular.





¿Qué es el ADN?

ADN ES LA ABREVIATURA de ácido desoxirribonucleico. La estructura química del ADN es una doble hélice formada por dos filamentos, que son largas cadenas de cuatro tipos diferentes de nucleótidos: adenina (A), citosina (C), guanina (G) y timina (T). La información genética contenida en el ADN explica tres aspectos fundamentales de la vida: 1) todos los procesos vivos en los organismos; 2) la precisión de la herencia biológica, y 3) la evolución biológica.

En primer lugar, el ADN contiene la información genética que dirige todos los procesos de la vida. La información está codificada en largas secuencias de los cuatro nucleótidos de forma análoga a como se transmite la información semántica mediante secuencias de letras del alfabeto. La cantidad de información genética en el ADN de los organismos es enorme porque la longitud de las moléculas de ADN de un organismo es inmensa. Por ejemplo, el genoma humano, es decir, el ADN que cada humano hereda de su progenitor, tiene tres mil millones de letras genéticas. Si quisiéramos im-

primir un genoma humano necesitaríamos mil libros, de mil páginas cada uno, con tres mil letras en cada página (equivalente a unas quinientas palabras). Los científicos no imprimen genomas humanos completos, ni de otros organismos, sino que almacenan electrónicamente la información del ADN en ordenadores.

Una segunda cualidad del ADN es que explica la precisión de la herencia biológica. Las dos cadenas en la doble hélice del ADN son complementarias; ambas llevan la misma información genética y cualquiera de las dos cadenas puede servir como patrón para la síntesis de una cadena complementaria idéntica a la cadena complementaria original. Cada uno de los cuatro nucleótidos se aparea, en la cadena complementaria, únicamente con uno en concreto de los otros tres. A sólo se aparea con T, y C sólo se aparea con G. Por ejemplo, si un segmento corto de una cadena está formado por una secuencia ATTCAGCA, la cadena complementaria será TAAGTCGT. Esta complementariedad explica la fidelidad de la herencia biológica. En el proceso de replicación, las dos cadenas helicoidales se desenroscan y cada una sirve como patrón para la síntesis de una cadena complementaria, de manera que las dos dobles hélices hijas son idénticas entre sí y respecto a su molécula materna. Por tanto, la secuencia ATTCAGCA dirigiría la síntesis de una cadena complementaria, TAAGTCGT, idéntica a su patrón en la molécula original de ADN. Igualmente, la cadena original TAAGTCGT dirigirá la síntesis de una cadena complementaria, ATTCAGCA, dando como resultado una doble hélice de

secuencia idéntica a su hermana y a su doble hélice materna.

La tercera propiedad fundamental del ADN es la mutación, que hace posible la evolución de los organismos. Por regla general, la información codificada en la secuencia de nucleótidos del ADN se reproduce fielmente durante la replicación, de manera que cada replicación da como resultado dos moléculas de ADN idénticas entre sí e idénticas a la molécula materna, como se acaba de explicar. La fidelidad del proceso es enorme pero no perfecta. A veces se dan mutaciones en la molécula de ADN durante la replicación, de manera que células hijas difieren de las células progenitoras (y entre ellas) en la secuencia de nucleótidos o en la longitud del ADN. Las mutaciones suelen afectar a una sola letra (nucleótido), pero a veces las mutaciones pueden abarcar varias o muchas letras. La mutación aparece primero en el ADN de una sola célula del organismo, y el nuevo ADN alterado pasa a todas las células descendientes de la primera.

Un claro ejemplo de mutación con consecuencias importantes en la historia reciente de Europa es el que explica la hemofilia, una enfermedad habitualmente mortal, determinada por una mutación en el cromosoma X. El sexo en los humanos viene determinado por los cromosomas X. Las mujeres tienen dos cromosomas X; los hombres tienen un cromosoma X y un cromosoma Y. Las mujeres con la mutación de hemofilia en un cromosoma X no padecen la enfermedad pero

sí la transmiten a sus hijos varones (un 50% aproximadamente); éstos habrán heredado el cromosoma X con la mutación de hemofilia. Esta mutación de hemofilia se dio en uno de los cromosomas X de la reina Victoria. La mutación se transmitió a través de sus hijas y nietas a Rusia, España y otras familias reales europeas. El zarevich Alexis, el único hijo varón del zar Nicolás II de Rusia, heredó la hemofilia de su madre Alejandra, nieta de la reina Victoria. El príncipe Alfonso, heredero del trono de España, la heredó de otra abuela, la reina Ena, esposa del rey Alfonso XIII. Los historiadores políticos creen que la hemofilia de los herederos al trono contribuyó a la caída de las dos casas reales.

Las mutaciones que tienen importancia para la evolución son las que ocurren en las células sexuales (óvulos y esperma) o en aquéllas de las que derivan células sexuales, pues éstas son las células que producirán la siguiente generación. Las mutaciones que se dan en otras células suelen tener pocas consecuencias y pasan desapercibidas. Sin embargo, algunas mutaciones pueden provocar la aparición de cáncer u otras enfermedades. Hay casos destacados en los que, por ejemplo, una persona tiene los ojos de colores diferentes. Estas situaciones son poco habituales porque las mutaciones son poco habituales.

Se han medido los índices de mutación en una gran variedad de organismos, sobre todo los mutantes que provocaban efectos llamativos, como el cambio en el color de un ojo o efectos metabólicos que causan enfermedades. En los humanos y otros animales, los índices de mutación suelen extenderse entre una mutación por cada cien mil células hasta una mutación por cada millón de células. A pesar de que los índices de mutación son muy bajos, en cada generación aparecen nuevas mutaciones en todas las especies porque hay muchos individuos en cada especie y muchos genes en cada individuo. La población humana está formada por más de seis mil millones de personas. Basta con que se diera una mutación en cada millón de individuos para que los humanos llevaran colectivamente seis mil nuevas mutaciones por cada posible mutación.

Las mutaciones del ADN posibilitan la evolución de los organismos. Pero si las mutaciones fueran mucho más frecuentes de lo que son, provocarían múltiples defectos e incluso una desorganización total. Es más probable que las mutaciones causen defectos o enfermedades que beneficios, porque desorganizan la secuencia de ADN establecida de un organismo, la cual ha sido seleccionada a través de miles de generaciones para facilitar su supervivencia y reproducción en el entorno en que vive. Sin embargo, como se ha explicado anteriormente, el proceso de mutación proporciona a cada generación numerosas variaciones genéticas que, mientras no son letales o muy dañinas, se añaden a las mutaciones arrastradas desde generaciones previas. Esto quiere decir que las especies no están formadas por individuos genéticamente homogéneos sino, más bien, por individuos que difieren entre sí por numerosas variaciones. Por tanto, no sorprende ver que ante nuevos

desafíos medioambientales, las especies puedan adaptarse a ellos. Por ejemplo, más de cien especies de insectos han desarrollado una resistencia al pesticida DDT en las partes del mundo en donde se ha usado intensamente. Aunque estos insectos nunca se habían encontrado con este componente sintético en su pasada historia evolutiva, las mutaciones preexistentes permitieron que algunos sobrevivieran ante la presencia de DDT. Esta *adaptación* se multiplicó rápidamente mediante selección natural porque sólo los insectos resistentes al DDT sobrevivieron y crearon a las generaciones siguientes.

La resistencia a enfermedades causadas por bacterias y otros parásitos ante los antibióticos y otros fármacos es una consecuencia del mismo proceso. Cuando un individuo toma un antibiótico que mata la bacteria específica que provoca la enfermedad, digamos la tuberculosis, la inmensa mayoría de las bacterias mueren, pero una entre varios millones puede experimentar una mutación que proporcione resistencia al antibiótico. Estas bacterias resistentes sobrevivirán y se multiplicarán, y ese antibiótico ya no curará la enfermedad en ese individuo o en cualquier persona contagiada por la bacteria resistente. Por este motivo, actualmente la medicina trata las enfermedades bacteriales con cócteles de antibióticos. Si la incidencia de una mutación con resistencia a un antibiótico es una entre un millón, la incidencia de una bacteria que lleve tres mutaciones, cada una de ellas otorgando resistencia a uno de tres antibióticos, es de una entre un trillón (una entre un

millón de millón de millones); es poco probable, o incluso imposible, que esa bacteria resistente a los tres antibióticos exista en un individuo infectado.

Las mutaciones que hacen que la bacteria sea resistente a los antibióticos a los que están expuestas son beneficiosas para la bacteria y se propagan rápidamente a través de la población bacteriana. En nuestra historia evolutiva se han producido mutaciones beneficiosas para los humanos o nuestros ancestros, que explican los rasgos que nos distinguen como humanos. Un ejemplo es *FOXP2*, el primer gen identificado en relación con el lenguaje. Las especies mamíferas comparten el gen *FOXP2*, que desempeña una importante función en el desarrollo de la membrana pulmonar. En el linaje humano se produjeron dos mutaciones que permitieron al gen *FOXP2* adquirir una nueva función, llamada lenguaje, en la que desempeña un papel crucial. Por consiguiente, el gen mutado fue favorecido por selección natural en nuestros ancestros y se propagó con rapidez a través de la población humana. Se piensa que esto ocurrió hace unos 200 000 años, coincidiendo aproximadamente con la evolución de los humanos modernos. Recientemente se han identificado mutaciones en una familia humana en la cual una disfunción del gen *FOXP2* trajo como consecuencia una deficiencia grave del habla.

La duplicación del gen es un tipo de mutación que tiene consecuencias muy significativas en la evolución. Si un gen se duplica, una copia puede seguir desempe-

ñando la función original, mientras que la otra puede adquirir una nueva función. Un ejemplo muy conocido es el de la evolución de los genes de la globina y su asociación con la respiración. Una duplicación ancestral permitió a un gen implicarse en el metabolismo del oxígeno en el músculo (mioglobina), y al otro en la sangre (hemoglobina). Una mayor duplicación del gen de la hemoglobina hizo posible la evolución del eficaz y moderno tetrámero de la hemoglobina, formado por dos componentes (polipéptidos) de un tipo y dos de otro. La hemoglobina A, que fabrica el 98 por ciento de la hemoglobina de un humano adulto, está formada por dos polipéptidos alfa y dos beta. Las duplicaciones adicionales han dado como resultado una especialización adicional, como el gen gamma que está activo en el feto humano.

El ADN ha recibido el nombre de *molécula maestra* porque dirige el desarrollo y funcionamiento de los organismos. El ADN en interacción con el entorno (tanto el entorno de la célula como el entorno externo, como un río o un bosque en donde pueda vivir el organismo) determina los rasgos de los organismos, es decir, su *fenotipo*, el cual (en sentido amplio) incluye no sólo su apariencia sino también su comportamiento. El ADN ejercita su *maestría* a través de dos pasos intermedios. En el primer paso se transcribe la información en la secuencia de nucleótidos de la doble hélice del ADN, se copia en un nuevo tipo de molécula llamada *ARN mensajero* (ARNm; ARN viene de ácido ribonucleico). En el proceso de trascripción, se copia una de las cade-

nas de ADN siguiendo el mismo procedimiento que en la duplicación del ADN, excepto que el ARN tiene uracilo (U) en vez de timina (T). Por tanto, el segmento de ADN, ATTCAGCA, al transcribirlo en ARN, queda como UAAGUCGU.

El ADN está en el núcleo de la célula y es ahí donde se transcribe en ARNm. Este ARNm se traslada ahora desde el núcleo al citoplasma, el cuerpo principal de la célula, y allí se *traduce* en una proteína o polipéptido. Los polipéptidos fabrican proteínas, y algunas proteínas están formadas por más de un polipéptido. Por ejemplo, la hemoglobina que predomina en nuestras arterias y venas está compuesta por cuatro polipéptidos, como hemos indicado anteriormente: dos de un tipo (alfa hemoglobina) y dos de otro tipo (beta hemoglobina). Las proteínas son cadenas de aminoácidos. Hay veinte tipos de aminoácidos. La información de ADN transportada en una secuencia de nucleótidos se traduce en una secuencia de aminoácidos.

Recordemos ahora que las proteínas están formadas por veinte tipos diferentes de aminoácidos. ¿Cómo se traduce el lenguaje de cuatro letras del ADN y el ARN al lenguaje de veinte letras de las proteínas creadas? El truco está en que las letras del ARNm se leen de tres en tres. Cada grupo de tres letras consecutivas se llama *triplete* o *codón*. Por ejemplo, el triplete AGC se lee como serina, y el triplete AUG se lee como metionina. La serina y la metionina son dos de los veinte aminoácidos. Hay sesenta y cuatro combinaciones posibles de triple-

tes (codones) de cuatro tipos de letras (nucleótidos). Por tanto, el código genético es redundante; algunos aminoácidos están codificados por varios tipos de codones. Por ejemplo, la serina está codificada por el triplete AGU y por el AGC.

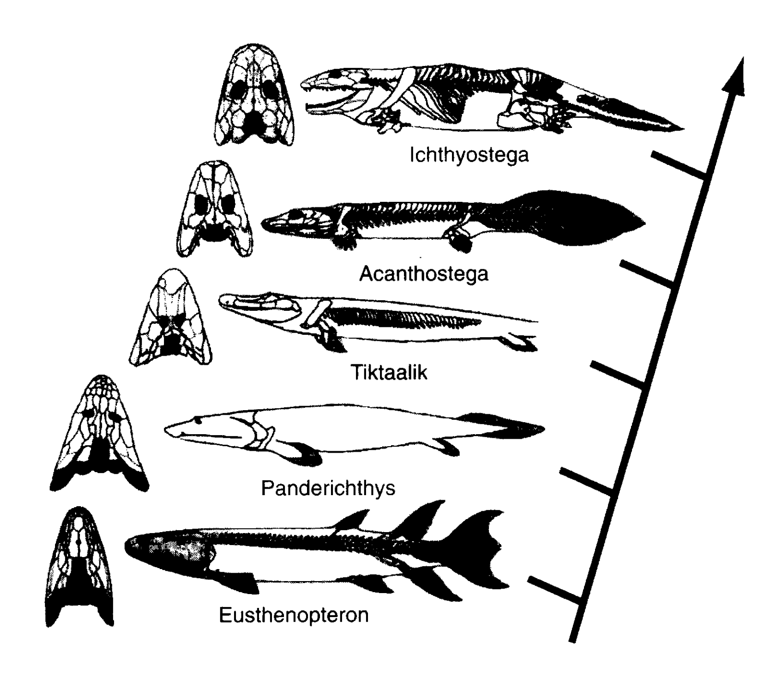
Hay dos tipos de proteínas. Algunas son importantes componentes estructurales del organismo. Por ejemplo, el colágeno es el componente proteico principal del hueso. Otras proteínas son enzimas, catalizadores que intervienen en las reacciones químicas en todos los organismos. Podemos ver las enzimas como máquinas moleculares que intervienen en todos los procesos vitales en el interior de las células; es decir, las enzimas catalizan la transformación de una sustancia en otra. Las enzimas son máquinas tremendamente efectivas; son miles o millones de veces más efectivas que la máquina más eficaz creada por el hombre. El objetivo de la llamada nanotecnología es precisamente diseñar moléculas que puedan actuar como enzimas y utilizar esas máquinas para generar los productos deseados, con una eficiencia inmensamente mayor que la de las máquinas que se usan hoy día en las industrias humanas, incluidas las tecnologías de la información. La mayoría de los productos químicos de las células son el resultado de una serie de reacciones en cadena, cada una catalizada por una enzima diferente. La información genética que da cuenta de la fabricación de proteínas se encuentra siempre en la secuencia de nucleótidos del ADN, que es la molécula que explica la fidelidad de la herencia biológica pero

también la evolución como consecuencia de mutaciones del ADN.

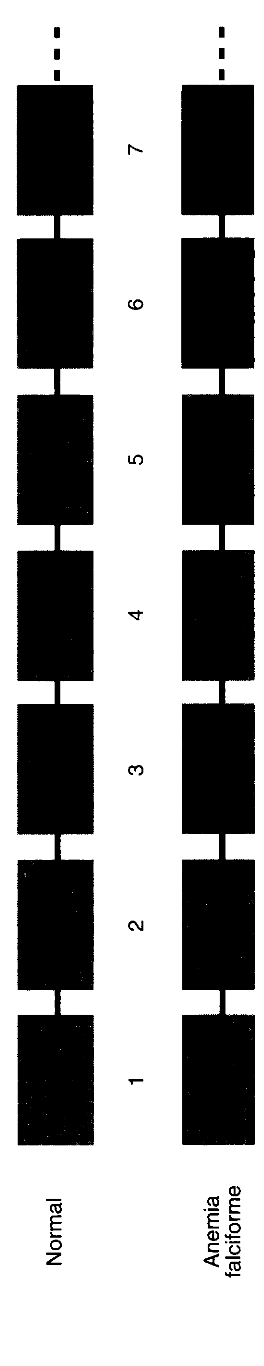
En el capítulo 2 se afirma que la evolución es tanto una teoría como un hecho. En el siguiente capítulo revisamos las clases de evidencias que apoyan esta afirmación, tomando ejemplos de la paleontología, la anatomía, la biogeografía y la biología molecular. Los expertos disponen de enormes evidencias: cientos de libros y miles de artículos de investigación publicados cada año en revistas científicas. Como se declaraba en la introducción, los científicos aceptan la evolución de los organismos con la misma confianza con que aceptan otras teorías consolidadas, como la teoría atómica y la teoría genética de la herencia.



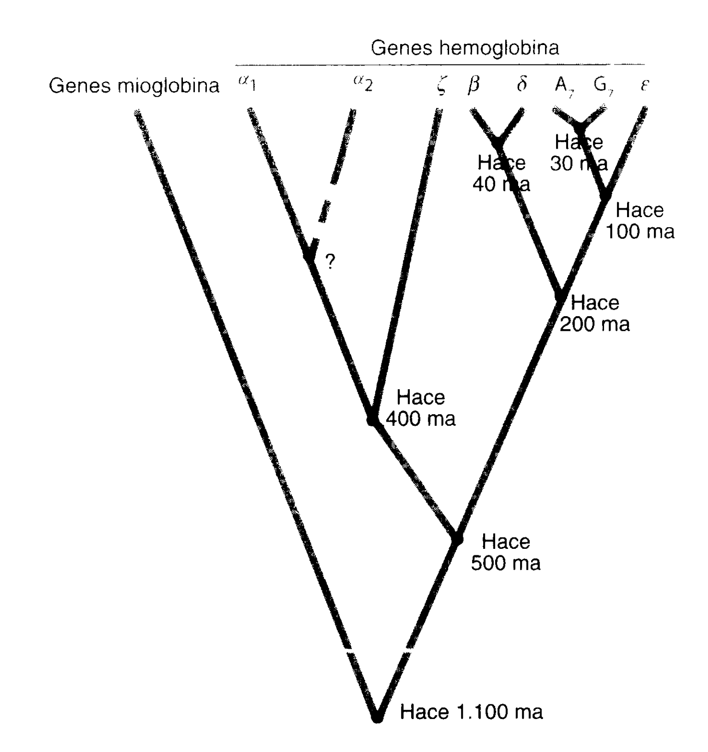
Un fósil *Archaeopteryx* que muestra rasgos intermedios entre los dinosaurios (reptiles) y las aves. Los *Archaeopteryx* eran animales pequeños, como del tamaño de un cuervo, que vivieron en el período jurásico tardío, hace unos 60 millones de años en Europa central. En Baviera se descubrieron varios especímenes de fósiles muy bien conservados; el primero en 1868, y el más reciente en 2005. El *Archaeopteryx* exhibe algunos rasgos similares al pequeño dinosaurio bípedo, incluida la mayor parte de su esqueleto. Otros rasgos, como el cráneo, el pico y las plumas, se parecen a los de las aves, como se observa claramente en los fósiles. (Por cortesía del Museum für Naturkunde, Berlín.)



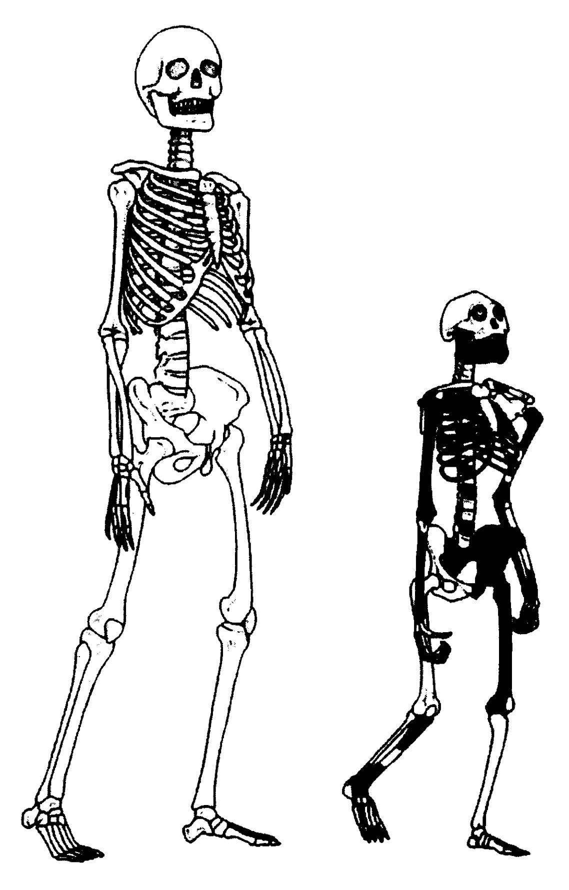
El *Tiktaalik* y otros fósiles intermedios entre el pez y los anfibios (tetrápodos), que vivieron hace entre 385 millones de años (*Eusthenopteron,* el más parecido al pez de los que aparecen en la imagen) y 358 millones de años (*Ichthyostega,* con rasgos claramente anfibios). En el año 2006 se descubrieron varios especímenes de *Tiktaalik* en sedimentos de un río del Devónico tardío, fechado de hace unos 380 millones de años, en la isla de Ellesmere, en Nunavut (Ártico canadiense). (Adaptado de Ahlberg P, Clark JA, «Palaeontology: A Firm Step from Water to Land», *Nature,* 440 (2006), p. 747.)



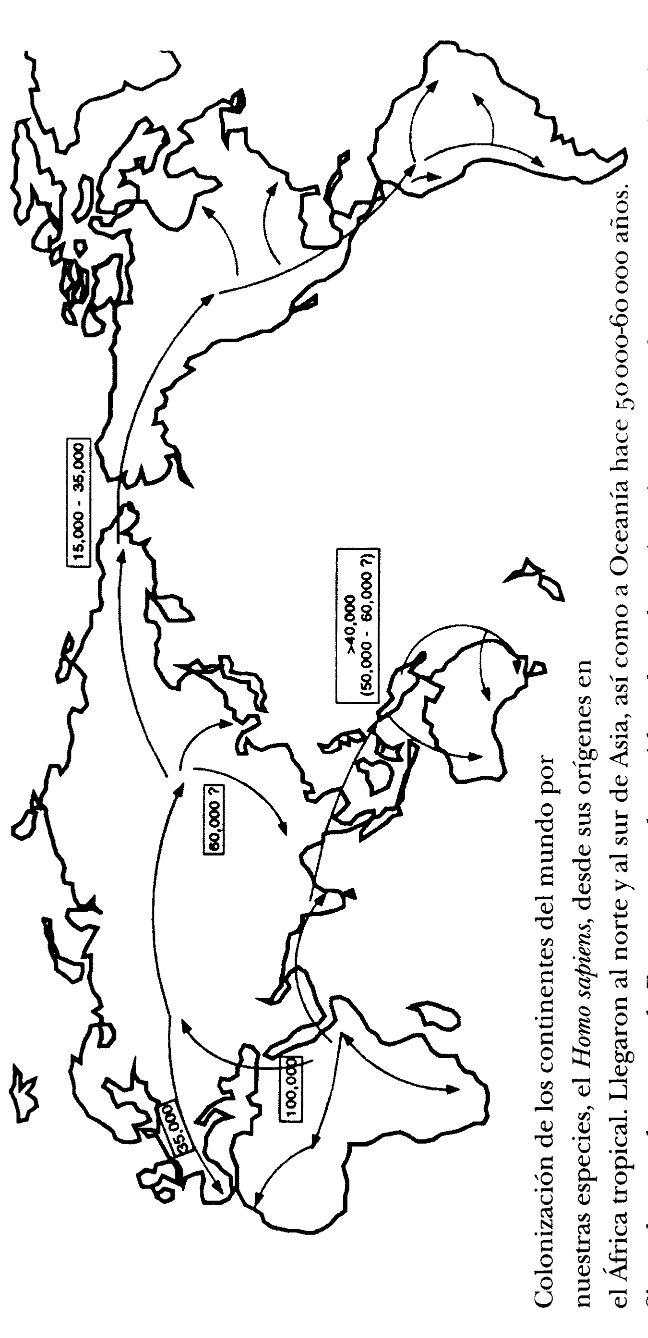
Los siete primeros aminoácidos de la cadena beta de la hemoglobina humana. El polipéptido beta está formado por 146 aminoácidos. Una mutación en el gen codificado para el polipéptido beta da como resultado la sustitución del aminoácido valina por el ácido glutámico. Los sujetos que han heredado el gen mutado de los dos progenitores no pueden producir hemoglobina A normal y, por tanto, padecen una grave enfermedad conocida como anemia falciforme. Los sujetos que han heredado el gen normal de un progenitor, y el mutado de otro, no presentan la enfermedad y, además, están protegidos contra la malaria, una infección maligna muy común en los trópicos. Esta situación no es rara: las personas que tiene dos formas de un gen, uno mutado y otro no, cada uno heredado de uno de sus progenitores, están mejor que los sujetos con dos copias idénticas del mismo gen. Pero el caso del gen beta hemoglobina es de los más extremos.



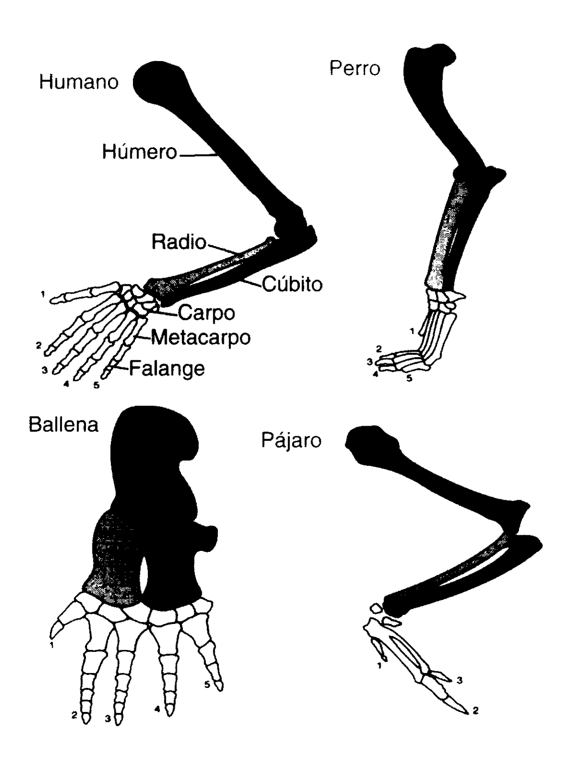
Historia evolutiva de los genes globina que dan cuenta del metabolismo del oxígeno. Las duplicaciones de genes, ocurridas a lo largo de intervalos de tiempo, hicieron posible que cada uno de los dos duplicados adquiriera unas funciones diferentes. Los puntos negros indican el sitio en el que se duplicaron los genes ancestrales dando lugar a un nuevo linaje del gen. Los números junto a los puntos indican (en millones de años [ma]) el momento en que ocurrieron las duplicaciones. Una duplicación temprana permitió al gen participar en el metabolismo del oxígeno en el músculo (mioglobina), y al otro gen en el transporte del oxígeno en sangre (hemoglobina). Más duplicaciones de los genes de hemoglobina posibilitaron especializaciones adicionales.



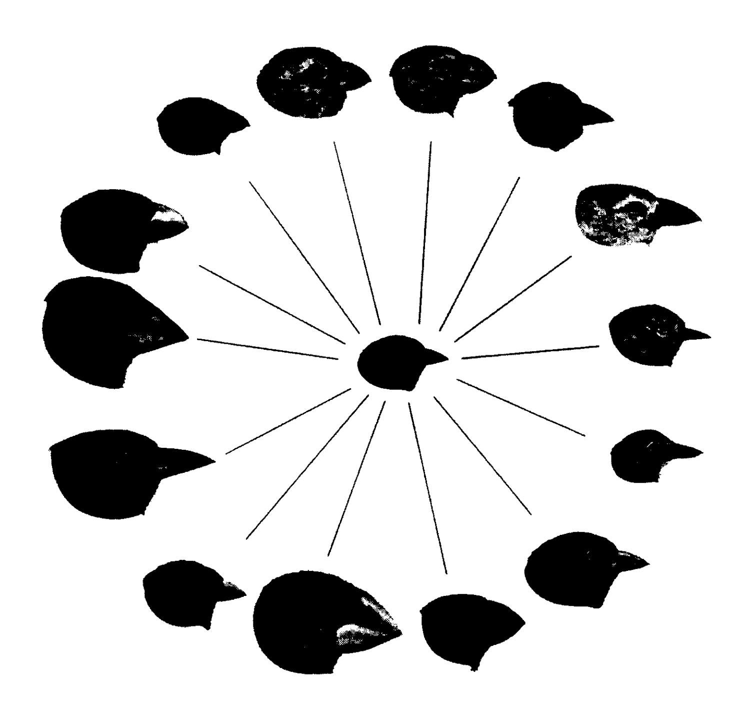
Esqueleto de un humano moderno comparado con Lucy, un ejemplar de *Australopithecus afarensis*, una especie ancestral del humano moderno que vivió hace unos 3,5 millones de años; caminaba sobre dos pies pero tenía un cuerpo y un cerebro pequeños. Alrededor de un 40 por ciento del esqueleto de Lucy (*sombreado en la figura*) se encontró en un mismo lugar.



Colonización de los continentes del mundo por nuestras especies, el *Homo sapiens*, desde sus orígenes en el África tropical. Llegaron al norte y al sur de Asia, así como a Oceanía hace 50 000-60 000 años. Sin embargo, alcanzaron la Europa central y occidental mucho más recientemente, hace unos 35 000 años, lo cual es bastante enigmático. Una explicación verosímil es que Europa estaba habitada desde hace unos 200 000 años por los Neandertal, y esto pudo haber frenado la colonización, por parte del *Homo sapiens*, hasta que los Neandertal se extinguieron, hace unos 30 000 años. (Ligeramente modificado de Cavalli-Sforza LL, Menozzi P, Piazzo A. *The History and Geography of Human Genes*, Princeton University Press, Princeton (NJ), 1994, p. 156.)

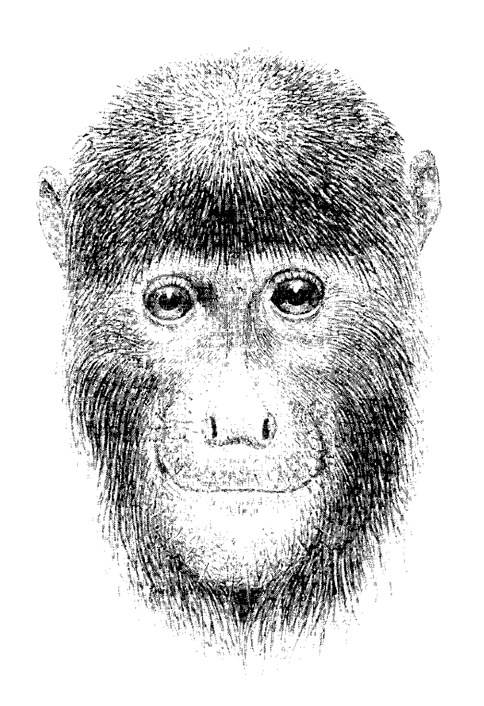


Esqueleto de las extremidades delanteras de cuatro vertebrados, con huesos similares, y ordenados de forma semejante para diferentes funciones en el ser humano, el perro, la ballena y el pájaro. Los evolucionistas explican la espectacular semejanza de esas estructuras, que sirven para funciones dispares, por medio del origen evolutivo común, con modificaciones graduales a medida que los organismos se adaptan a sus diferentes formas de vida. La similitud de las estructuras es enorme entre organismos de parentesco muy cercano (por ejemplo, entre distintos tipos de roedores); sin embargo, la similitud es menor entre especies menos cercanas en su historia evolutiva. Por tanto, las semejanzas morfológicas son menores entre mamíferos y aves que entre especies de mamíferos (por ejemplo, un gato y un perro), y son aún menores entre mamíferos y peces. Las semejanzas morfológicas no sólo constituyen una evidencia de la evolución sino que también ayudan a los evolucionistas a reconstruir la historia evolutiva de los organismos.



Pinzones de Darwin. Catorce especies de las islas Galápagos que evolucionaron a partir de un ancestro común. Las diferentes especies se alimentaron con comida diferente y desarrollaron picos adaptados a sus hábitos de alimentación. Las islas Galápagos están situadas en el ecuador, a seiscientas millas de la costa oeste de América del Sur. Al igual que las islas Hawai, su origen es volcánico y se formó en distintas épocas, desde hace unos 4,5 millones de años. Las islas Galápagos fueron colonizadas por una especie de pinzón de América del Sur continental, hace unos 3 millones de años. Las nuevas especies de pinzones evolucionaron a medida que fueron colonizando entornos accesibles en las diversas islas. (Adaptado de «Evolution, The Theory of», por cortesía de la *Encyclopædia Britannica, Inc.*).

4



¿Todos los científicos aceptan la evolución?

UNA MAYORÍA ABRUMADORA de biólogos aceptan la evolución. Los que conocen profesionalmente la evidencia de la evolución no pueden negarla. Los científicos están de acuerdo en que el origen evolutivo de los animales y las plantas es una conclusión científica más allá de toda duda. La evidencia es convincente y global ya que proviene de todas las disciplinas biológicas, incluidas aquéllas que no existían en la época de Darwin. En la segunda mitad del siglo XIX, Darwin y otros biólogos obtuvieron pruebas convincentes a partir de varias disciplinas que habían alcanzado una temprana madurez durante el siglo XIX: la anatomía, la embriología, la biogeografía, la geología y la paleontología. Desde la época de Darwin, la evidencia de la evolución se ha ido haciendo cada vez más fuerte y universal, no sólo a partir de las fuentes tradicionales sino también de disciplinas recientes como la genética, la bioquímica, la ecología, la etología, la neurobiología y la biología molecular.

Como hemos visto en el capítulo 2, la investigación evolutiva implica tres temas diferentes. Como la evidencia es tan abrumadora, el primer tema (la evidencia de la evolución) ya no supone un interés en los biólogos, excepto cuando explican la evolución al público o cuando discuten con quienes rehúsan aceptarla. Aunque ya no se investigue ni sea necesario, las pruebas sobre la evolución siguen acumulándose.

Actualmente, la investigación evolutiva pretende aprender más acerca de cómo se lleva a cabo la evolución, las causas o mecanismos del proceso y cómo ocurrió realmente la filogenia de los organismos, su historia evolutiva. Algunas aseveraciones se centran en la investigación del proceso histórico de la evolución en grupos concretos de organismos, ya sea porque éstos tienen un interés para los investigadores, o bien para resolver cuestiones con aplicaciones prácticas en la agricultura, la medicina o la industria. Por ejemplo, los expertos han averiguado que el maíz cultivado procede de una planta silvestre mexicana conocida como teosinta.

Cuando muere un organismo, normalmente es destruido por bacterias y otros organismos así como por procesos erosivos. En raras ocasiones, algunas partes del cuerpo, sobre todo las partes duras como dientes, huesos y caparazones, se conservan al quedar enterradas en barro o protegidas de cualquier otra forma frente a los depredadores, la descomposición y el clima, y pueden conservarse indefinidamente como fósiles en el interior de las rocas en las que están incrustados. (El

barro y otros sedimentos pueden transformarse con el tiempo en piedras calizas y otros tipos de rocas.)

El registro fósil es incompleto. Los paleontólogos sólo han recuperado y estudiado una diminuta fracción de la pequeña proporción de organismos conservados como fósiles. No obstante, en muchos casos, con el paso del tiempo, la sucesión de formas se ha reconstruido con bastante detalle. Un ejemplo lo tenemos en la evolución del caballo, que puede trazarse desde el *Hyracotherium*, un animal del tamaño de un perro con varios dedos en cada pie y dientes adecuados para el pasto ligero (capaz de comer brotes tiernos, ramitas y hojas de árboles y arbustos) que vivió hace más de 50 millones de años, hasta el *Equus*, el caballo moderno mucho más grande, de un solo dedo en el pie y con una dentadura adecuada para pastar (capaz de comer vegetación en crecimiento). Se ha descubierto una sucesión bastante detallada de los caballos intermedios, con sus cambios progresivos desde el *Hyracotherium* hasta el *Equus*.

Son especialmente interesantes los fósiles intermedios entre grupos principales de organismos (de los que muchos son conocidos). En el capítulo 2 se han citado dos ejemplos: el *Archaeopteryx* y el *Tiktaalik*. El *Archaeopteryx*, que vivió hace 60 millones de años, es un intermedio entre reptiles y aves. Tenía plumas, claramente visibles en los fósiles, mientras que el esqueleto es parecido al del reptil, a pesar de que el cráneo y el pico son también como los de un ave. A lo largo de los años se

han descubierto varios ejemplos de *Archaeopteryx*; el primero se descubrió en 1861, dos años después de que Darwin publicara *El origen de las especies*, y al cual se refirió en ediciones posteriores del libro. El fósil más reciente de *Archaeopteryx*, descubierto hace pocos años, puede verse en un museo privado de Wisconsin.

A lo largo de los años se han descubierto muchos especímenes intermedios entre el pez y los tetrápodos (anfibios), pero el más significativo es el *Tiktaalik*, descrito recientemente en el año 2006. En la isla Ellesmere, en Nunavut (Ártico canadiense), se encontraron varios especímenes del *Tiktaalik*, en sedimentos de 380 millones de años. Los científicos examinaron en concreto estos sedimentos porque pertenecen a la época en que se piensa que evolucionaron los primeros tetrápodos.

Para la mayoría de las personas, los fósiles intermedios de mayor interés son los que están entre los humanos y sus ancestros primates. Como se ha descrito en el primer capítulo, en los últimos cien años se han descubierto cientos de fósiles homínidos.

Los esqueletos de tortugas, aves, caballos, murciélagos, humanos y ballenas son sorprendentemente parecidos, a pesar de sus diferentes formas de vida y la diversidad de los entornos en que vivieron. Podemos ver fácilmente la correspondencia, hueso a hueso, en las extremidades. Desde una perspectiva de diseño o de ingeniería, parece incomprensible que una tortuga y una ballena naden, un perro corra, una persona escriba y

un ave o un murciélago vuelen con unas extremidades delanteras construidas con los mismos huesos y organizados en estructuras similares. Un ingeniero diseñaría extremidades mejores para cada finalidad. No obstante, si aceptamos que todos esos animales heredaron su estructura esquelética de un ancestro común y que ésta se modificó conforme se adaptaban a diferentes formas de vida, la semejanza de sus estructuras cobra sentido.

Los primeros apoyos para la teoría de la evolución también llegaron de la embriología, la ciencia que investiga el desarrollo de los animales desde el óvulo fertilizado hasta el momento del parto o salida del cascarón. Los peces, los lagartos, las aves y los humanos se desarrollan de manera muy similar durante las primeras etapas, pero van diferenciándose cada vez más, como embriones, al aproximarse al nacimiento. Las similitudes perduran más tiempo entre animales de parentesco más cercano (por ejemplo, humanos y monos) que entre los menos cercanos (por ejemplo, humanos y tiburones). Los embriones humanos tienen aberturas branquiales. Esas aberturas se encuentran en los embriones de vertebrados que nunca respiran a través de branquias, simplemente porque sus ancestros fueron peces que desarrollaron esas estructuras en primer lugar. La evolución explica por qué se forman estructuras durante el primer desarrollo que desaparecerán antes de nacer.

Número de especies nativas de grupos de plantas y animales en las islas Hawai

	Número de especies nativas	*Porcentaje endémico*
Helechos	168	65
Plantas con flor	1 729	94
Caracoles	1 064	> 99
Moscas Drosofila	510	100
Otros insectos	3 750	> 99
Mamíferos terrestres	0	0

La columna de la derecha muestra el porcentaje de especies que se dan de forma natural en Hawai. Muchas otras especies de plantas y animales han sido introducidas recientemente por los seres humanos.

Darwin vio evidencias de la evolución en la distribución geográfica de plantas y animales. Observó, por ejemplo, que en diferentes islas Galápagos había diferentes tipos de tortugas y pinzones, que a su vez eran distintos de los hallados en la América del Sur continental. Hay alrededor de 1 500 especies conocidas de moscas de la fruta de la familia *Drosophila* en todo el mundo; alrededor de un tercio de éstas viven únicamente en el archipiélago hawaiano, a pesar de que su superficie terrestre es inferior al 5 por ciento de la superficie de California. En Hawai también hay más de mil especies de caracoles que no se encuentran en ningún otro lugar. Por otro lado, no hay mamíferos nativos en Hawai, y también hay una gran ausencia de la mayoría de las clases de insectos. Estos patrones de diversidad se explican gracias a la evolución. Las islas Hawai y las Galápagos están extremadamente aisladas y

tuvieron pocos colonizadores. Aquellas especies que colonizaron las islas se encontraron con muchos nichos ecológicos desocupados, entornos locales adecuados para sostenerlos que ocuparon diversificándose en una variedad de especies. Los mamíferos nativos no existen ni en Hawai ni en las Galápagos debido a la escasa probabilidad que tenían los mamíferos de llegar a esos archipiélagos remotos.

La biología molecular, una disciplina que surgió en la segunda mitad del siglo XX, aproximadamente unos cien años después de la publicación del *El origen de las especies*, proporciona a la evolución de los organismos su prueba más sólida. La biología molecular demuestra la evolución de dos maneras: en primer lugar, mostrando la unidad de la vida en la naturaleza del ADN y el funcionamiento de los organismos a nivel de enzimas y otras moléculas proteicas (como se ha explicado en el capítulo 3); en segundo lugar, haciendo posible la reconstrucción de las relaciones evolutivas, antes desconocidas y, por último, confirmar, depurar y medir temporalmente todas las relaciones evolutivas entre los organismos vivos.

El ADN y las proteínas han sido denominados *macromoléculas informativas* porque son largas moléculas lineales formadas por secuencias de unidades (nucleótidos o aminoácidos) que contienen la información evolutiva, en la secuencia de sus componentes, de forma similar a la manera en que la información semántica está contenida en secuencias de letras del alfabeto. Al com-

parar la secuencia de los componentes en dos macromoléculas, se establece de qué manera son diferentes muchas unidades. La evolución normalmente se produce por el cambio de una unidad al mismo tiempo; de esta manera, el número de diferencias es una indicación de la cercanía del ancestro común. Por consiguiente, las deducciones de la paleontología, la biogeografía, la anatomía comparativa y otras disciplinas que estudian la historia evolutiva, pueden corroborarse en estudios moleculares del ADN y las proteínas de los organismos vivos, a través de un análisis de las secuencias de nucleótidos y aminoácidos.

Las investigaciones de la evolución molecular sólo pueden realizarse con las especies vivas de los organismos. Las secuencias de ADN y proteínas de organismos que vivieron hace tiempo no se conservan de forma adecuada para la investigación con los métodos de la biología molecular actualmente disponibles. Los fósiles más antiguos que se han investigado hasta el momento con los métodos moleculares (que incluyen, por ejemplo, momias egipcias, mamuts y algunos restos de neandertales) son sólo unos pocos millares, y tienen unos 60 000 años. Sin embargo, la biología molecular puede reconstruir relaciones evolutivas ancestrales y determinar, por ejemplo, cuáles de las especies más antiguas son ancestros de un grupo concreto de especies vivientes pero no de otras.

Los estudios evolutivos moleculares presentan tres importantes ventajas respecto a la anatomía comparativa y

otras disciplinas clásicas: *precisión*, *universalidad* y *multiplicidad*. En primer lugar, la información se cuantifica rápidamente. Se establece con facilidad el número de unidades que son diferentes cuando se conoce la secuencia de unidades para una macromolécula dada en diferentes organismos. Es tan fácil como alinear los nucleótidos o aminoácidos de las diferentes especies y hacer un recuento de las diferencias. La segunda ventaja, la universalidad, es que se pueden hacer comparaciones entre tipos de organismos muy diferentes. La anatomía comparativa o la paleontología no pueden decir mucho cuando se comparan organismos tan variados como hongos, pinos y seres humanos, pero hay muchas secuencias de ADN y proteínas que pueden compararse en los tres. La tercera ventaja es la multiplicidad: cada organismo posee miles de genes y proteínas, y cada uno de ellos refleja la misma historia evolutiva. Si la investigación de un gen o proteína concretos no resuelve satisfactoriamente la relación evolutiva de un conjunto de especies, se pueden investigar más genes y proteínas hasta que el material quede establecido.

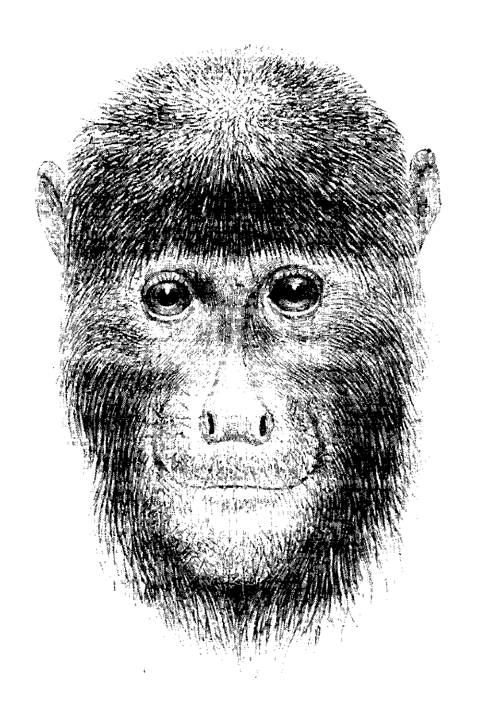
La biología molecular también es útil para el estudio de la evolución en otros sentidos. Las amplias diferencias en los índices de la evolución de diferentes conjuntos de genes proporcionan la oportunidad de investigar genes diferentes para conseguir distintos grados de resolución en el árbol de la evolución. Los evolucionistas se centran en los genes que se desarrollan lentamente para reconstruir acontecimientos evolutivos remotos, pero examinan genes que se desarrollan cada

vez más rápido para reconstruir la historia evolutiva de los organismos que han divergido recientemente.

Hoy día podemos hacer una afirmación que habría encantado a Darwin y que sorprenderá seguramente a quienes no estén familiarizados con los estudios evolutivos moleculares: ya no tienen por qué existir lagunas en el conocimiento de la historia evolutiva de los organismos vivos. La biología molecular ha hecho posible la reconstrucción del árbol universal de la vida, la continuidad desde las formas de vida originarias, los ancestros de todos los seres vivos, hasta todas las especies vivas de la Tierra. Se han reconstruido las ramas principales del árbol de la vida. Cada mes se publican artículos científicos más detallados sobre más y más ramas del árbol universal de la vida. La casi ilimitada información evolutiva, codificada en la cadena de ADN de los organismos, permite a los evolucionistas reconstruir, con todo el detalle que se desee, todas las relaciones evolutivas que conducen hasta los organismos de la actualidad. Sólo hay que invertir en los recursos necesarios (tiempo y costosos laboratorios) para poder responder a cualquier cuestión con toda la precisión que se quiera.

La evolución se produce a través de la selección natural de los organismos vivos que se reproducen y sufren mutaciones. ¿Cómo empezó la vida? ¿Hay organismos vivos en otros planetas? En el próximo capítulo exploramos estas cuestiones, indicando lo que sabemos y lo que desconocemos (que es mucho) sobre el origen de la vida.





¿Cómo empezó la vida?

Casi todos los biólogos coinciden en afirmar que la vida en nuestro planeta se originó espontáneamente por procesos naturales a partir de las mismas sustancias químicas que componen los organismos actuales: carbono, nitrógeno, oxígeno e hidrógeno. Los científicos también están de acuerdo en que todos los organismos vivos de la Tierra proceden de una única forma de vida original. ¿Significa esto que sabemos cómo comenzó la vida? Realmente, no. Aunque existen algunas ideas interesantes y se han realizado experimentos válidos sobre el origen de la vida, todavía no hay un consenso general acerca de cómo pudo haber empezado. Lo que sí sabemos (porque la evidencia es abrumadora) es que toda la vida en la Tierra se desarrolló a partir de un único origen. Volveremos a esta cuestión más adelante; ahora vamos a examinar dónde están las dificultades para demostrar cómo se originó la vida.

Empecemos con la pregunta ¿qué es la vida? La vida tiene dos propiedades esenciales: la herencia y el meta-

bolismo. Las células se reproducen dividiéndose, haciendo copias de sí mismas. Las células hijas deben heredar los mismos componentes que conforman la célula madre para que haya una continuidad de vida. En esos componentes se incluyen las instrucciones sobre la maquinaria química de la célula: qué sustancias químicas se fabricarán y cómo funcionarán. Las propias instrucciones están codificadas en sustancias químicas. Pero la síntesis de las instrucciones químicas necesita la maquinaria química de la célula. Ya para empezar, nos encontramos con el problema del huevo y la gallina. Las instrucciones indican cómo funcionará la maquinaria química, pero no se pueden sintetizar sin ella. Pensemos en un documento que queremos copiar: necesitamos la máquina fotocopiadora para hacer la copia. Mejor aún, pensemos en ordenadores electrónicos: necesitamos un *hardware* que ejecute las instrucciones, y además un *software* que nos las proporcione. En la vida, el *software* incluye las instrucciones para fabricar el ordenador.

Los componentes que llevan la información son las moléculas de ADN y ARN. El ADN y el ARN son cadenas formadas por cuatro tipos de componentes químicos, representados por las letras A, C, G y T, en el ADN, y por A, C, G y U, en el ARN; es decir, la U sustituye a la T en el ARN. Como se describió en el capítulo 3, la información hereditaria está contenida en secuencias de las cuatro letras de forma similar a las letras del alfabeto. La maquinaria que lleva a cabo las reacciones químicas (llamada metabolismo) está formada por enzimas, que son proteínas capaces de catalizar reacciones químicas con gran precisión y a una velocidad muy superior a la de las máquinas fabricadas por los seres humanos. Las proteínas están formadas por largas cadenas de veinte componentes diferentes, llamados aminoácidos.

Una célula está formada por miles y miles de componentes, incluyendo miles de tipos de enzimas diferentes que llevan a cabo, con una eficacia y precisión tremendas, miles de reacciones químicas, y muchas de ellas determinaron precisamente las secuencias de las reacciones. A través de las representaciones gráficas de procesos celulares, observamos que constituyen una red extremadamente compleja, como la imagen gráfica de todo el sistema de transportes de Estados Unidos. Hay autopistas, carreteras interestatales y estatales, todo tipo de rutas adicionales, caminos, calzadas para coches y carreteras de acceso; también hay pozos petrolíferos, refinerías, gasolineras y coches, camiones, motocicletas y otros vehículos, así como las fábricas donde se construyen; además, también hay ríos, canales, puertos y todo tipo de barcos, además de aeropuertos, aerolíneas, aviones y las fábricas donde se construyen. Probablemente, la compleja red de transportes estadounidense no es tan extremadamente compleja como la red de componentes y reacciones químicas que tiene lugar en la célula.

Consideremos ahora la pregunta ¿cómo empezó la red de transportes de Estados Unidos? Probablemente con

simples rutas a pie, a las que siguieron carreteras —pavimentadas o no— adecuadas para carros y carromatos. Sin embargo, sería difícil determinar cuándo se dio forma a las primeras rutas, qué ciudades o pueblos conectaban, y otras características. Las primeras rutas en Norteamérica se crearon hace pocos miles de años. Por el contrario, la vida en la Tierra se originó hace varios miles de millones de años; por tanto, determinar los orígenes de los caminos de la vida es de lo más difícil.

Si queremos saber cómo empezó la vida por primera vez, necesitamos identificar los componentes primitivos que crearon las formas de vida más simples. Como hemos comentado anteriormente, desde el comienzo nos encontramos con el problema del huevo y la gallina. Necesitamos moléculas de información, como el ADN y el ARN, que transportan desde la célula madre hasta las células hijas la información acerca de qué enzimas van a sintetizarse y cómo sintetizarlas. Pero el ADN y el ARN necesitan sintetizarse, y para esto necesitamos el metabolismo, la maquinaria química de los procesos vivos. Volviendo a la metáfora del ordenador, en la vida, el *software* tiene la información sobre cómo construir el ordenador, pero el *software* (moléculas hereditarias) no puede leerse sin el ordenador (maquinaria metabólica). Una vez que hay ordenador, desaparece el problema. Pero el problema reside en cómo conseguir el primer ordenador.

En 1953, Stanley Miller, un estudiante diplomado en Química en la Universidad de Chicago, realizó en un

aparato de vidrio la simulación de las condiciones que pudieron darse en nuestro planeta inmediatamente después de su nacimiento. Introdujo algunas sustancias químicas inorgánicas, como amoníaco y gases metano e hidrógeno, y añadió vapor de agua y descargas eléctricas para simular un relampagueo. Tras una semana, en el frasco de vidrio de cinco litros en el que se realizaba el experimento, se formaron aminoácidos y otros componentes, como la urea, que se encuentran de forma natural en los organismos. De esta manera, Miller demostró que podían crearse componentes orgánicos sin la intervención de enzimas. En experimentos posteriores, bajo condiciones más semejantes a las de la Tierra primitiva, se confirmó que los componentes orgánicos simples se pueden formar espontáneamente. Hoy día, esta posibilidad se considera un hecho, gracias a una multitud de experimentos pero también porque se han encontrado moléculas simples orgánicas en meteoritos que han caído en nuestro planeta, en cometas e incluso en nubes de gas interestelares.

La pregunta sigue siendo cómo se juntaron esos componentes básicos para formar moléculas más complejas, como las enzimas y el ADN, o las células vivas. Uno de los argumentos preferidos es que cuando la Tierra se enfrió lo suficiente como para permitir la formación de los océanos, ocurrió algo parecido al proceso observado por Miller y otros investigadores, que dio como resultado un caldo de cultivo de moléculas orgánicas (un *caldo primigenio*), el cual, tras un período suficiente de tiempo (¡fueron suficientes muchos millones de

años!), podría haber producido, por una combinación azarosa de moléculas, alguna entidad reproductora que a su vez podría haber evolucionado hasta la vida tal y como la conocemos hoy.

Aun así, persiste el problema del huevo y la gallina: ¿cómo logramos la continuidad de la vida, es decir, las moléculas hereditarias que especifican la síntesis de las enzimas para llevar a cabo los procesos de vida, antes de tener enzimas? Hubo un avance importante a principios de la década de los ochenta cuando Thomas R. Cech y Sydney Altman descubrieron, de forma independiente, que algunas moléculas de ARN pueden catalizar reacciones químicas, incluida su propia síntesis; este descubrimiento les valió el Premio Nobel en 1989. Dicho descubrimiento contribuyó de forma muy importante a resolver el problema del huevo y la gallina, ya que estas moléculas de ARN, apodadas ribozimas, podían desempeñar las dos funciones: la hereditaria y la metabólica, funciones normalmente realizadas por moléculas diferentes, el ADN y las proteínas, respectivamente, en los organismos vivos actuales. Hoy día, muchos científicos creen que la vida atravesó una etapa controlada por el ARN, denominada *mundo ARN*, que precedió al actual mundo ADN, en el que la herencia biológica está predominantemente contendida en las moléculas de ADN.

Recientemente, los esfuerzos están focalizados a determinar cómo pudieron formarse las moléculas de ribozima del ARN de forma espontánea en la Tierra primitiva, que condujeron finalmente al mundo ARN. Las ribozimas, como otras moléculas del ARN, están constituidas por cuatro tipos de nucleótidos, representados por las letras A, C, G y U, como se ha indicado anteriormente, y están formadas por un número limitado de nucleótidos, aproximadamente unos veinticuatro. Sin embargo, los nucleótidos están lejos de ser simples; están compuestos por tres componentes moleculares: una ribosa (azúcar), una base nitrogenada y una base de fosfato. La base es el único constituyente que varía de un nucleótido a otro. Hay cuatro tipos de bases de nitrógeno diferentes, que se corresponden con los nucleótidos A, C, G y U. Recientemente, los científicos han demostrado cómo se enlaza espontáneamente la ribosa con las bases de nitrógeno C y U, que era el paso más difícil de explicar.

Una vez que las moléculas de ARN se han formado hasta poder reproducirse mediante la copia de sí mismas, aunque sujetas a algún error (mutación) en la síntesis de nuevas moléculas de ARN, se produce la selección natural, que conduce a una complejidad molecular mayor y, finalmente, a las células; en primer lugar, crea células simples como ocurre en las bacterias, y después se crean formas más avanzadas, como en los animales, las plantas y otros organismos eucariotas. La selección natural es la reproducción diferencial de variantes hereditarias alternativas. Una vez que hubo células primitivas capaces de reproducirse, lo más probable es que algunas se reprodujeran de forma más eficaz que otras. Las características de las células que se reproducían de

forma más eficaz aumentaban en frecuencia a expensas de las que lo hacían de forma menos eficaz. Es evidente que las células que se reproducían de manera más eficiente solían ser aquéllas que tenían una mayor precisión hereditaria y un metabolismo más eficaz.

Por tanto, ¿sabemos ya cómo comenzó la vida? No. Sabemos solamente que en ausencia de vida previa y bajo condiciones que probablemente pudieron existir en la Tierra primitiva, procesos químicos espontáneos pueden dar origen a componentes orgánicos, incluidos aquéllos que constituyen los elementos esenciales de la vida: los ácidos nucleicos que contienen la herencia, y las enzimas que dan cuenta del metabolismo (por ejemplo, las proteínas que catalizan las reacciones químicas encargadas de todos los procesos de la vida). No hay motivo para suponer que sea necesaria la intervención de un agente sobrenatural para explicar el origen de la vida. Volviendo a la analogía de la red de transportes, ahora sabemos que los primeros senderos pudieron construirse y también sabemos cómo pudieron desarrollarse carreteras más avanzadas a partir de ellos. Lo que no sabemos es dónde se crearon esos primeros senderos, ni cómo se hicieron exactamente. También sabemos ahora que la vida en la Tierra sólo se originó una vez, o si se originó más de una vez, todas las formas de vida excepto ésta se extinguieron.

La razón por la que sabemos que todos los organismos vivos proceden de un único origen es que los organismos que actualmente viven en la Tierra comparten procesos de vida fundamentales que sólo podían haber surgido de un mismo origen. Todos los organismos, desde las bacterias y otros microscópicos hasta los animales, las plantas y los hongos, comparten ciertos rasgos. La lista de rasgos que pudieron adquirir configuraciones alternativas, y que sin embargo son uniformes a lo largo y ancho de la vida, es muy extensa. Podemos comenzar la lista con el ADN, la misma molécula hereditaria en todos los organismos, constituida siempre por los mismos cuatro nucleótidos a pesar de que existen muchas posibilidades químicas para formar otros nucleótidos. Los miles de variedades de proteínas que existen en cada organismo se sintetizan a partir de combinaciones diferentes (en secuencias de longitud variable) de veinte aminoácidos, los mismos veinte en todas las proteínas y en todos los organismos. No obstante, en la naturaleza hay otros cientos de aminoácidos. La compleja maquinaria en la que se codifica la información hereditaria, desde el núcleo hasta el cuerpo principal de la célula, es la misma en todas partes: la secuencia de nucleótidos en el ADN se encuentra transcrita en una secuencia complementaria de ARN (llamado ARN mensajero) que se traduce en secuencias específicas de aminoácidos que fabrican proteínas y enzimas que llevan a cabo los procesos de la vida. En esta traducción están involucradas moléculas específicas de ARN (ARN de transferencia) y complejos proteicos de ARN (ribosomas) compartidos universalmente. El diccionario genético que proporciona la traducción de la secuencia de ADN a la secuencia de aminoácidos también es universalmente compartido.

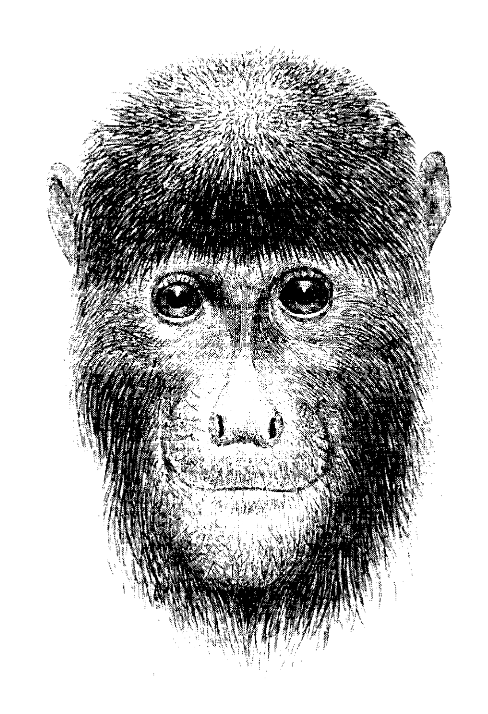
Existen muchas más propiedades de la vida universalmente compartidas. La unidad de la vida revela la continuidad genética y la ascendencia común de todos los organismos.

Probablemente, la Tierra es el único planeta en el sistema solar que actualmente tiene vida. Hay alrededor de 100 000 millones de estrellas en nuestra galaxia, y muchas de ellas tienen sistemas planetarios. Y hay más de 100 000 millones de galaxias en el universo. Fácilmente podría haber vida en algún lugar del cosmos. Algunos planetas, quizá muchos de ellos en todo el espacio, pueden tener vida si se dan la temperatura, la composición química y otros aspectos favorables para ella. Y esto parece posible dada la inmensa cantidad de galaxias, estrellas y planetas. La vida surgió en la Tierra porque en nuestro planeta existen las condiciones favorables. Con condiciones similares y largos períodos de tiempo, la vida probablemente podría surgir en otros planetas.

Si existiera vida en otros lugares, podría tener rasgos diferentes a los comentados anteriormente que muestran el único origen común de la vida en la Tierra. Incluso los elementos químicos básicos podrían ser diferentes; por ejemplo, el silicio, en lugar del carbono, podría combinarse con el hidrógeno, el oxígeno y otros elementos para crear las moléculas fundamentales de la vida. En unas pocas décadas, o en unos pocos siglos o milenios, nuestros descendientes podrían descubrir vida en otros lugares del universo. Seguramente, para entonces conocerán más de lo que ahora conocemos sobre la manera en que surgieron los rasgos distintivos de la vida en la Tierra.

A continuación abordaré un tema que no es estrictamente científico pero es de gran interés para muchas personas de fe y para filósofos, sociólogos e historiadores: la relación entre evolución y fe religiosa (o, de forma más amplia, entre ciencia y religión). ¿Son compatibles o antagónicas?

6



¿Se puede creer en la evolución y en Dios?

ESTOY CONVENCIDO DE que la evolución y las creencias religiosas no tienen por qué estar en contradicción. De hecho, si entendemos ciencia y religión de forma correcta, no pueden estar en contradicción pues se ocupan de asuntos distintos. La ciencia y la religión son dos ventanas diferentes para observar el mundo. Las dos ventanas miran el mismo mundo, pero muestran aspectos diversos de él. La ciencia se ocupa de los procesos que explican el mundo natural: cómo se mueven los planetas, la composición de la materia y la atmósfera, el origen y la adaptación de los organismos. La religión se ocupa del significado y la finalidad del mundo y de la vida humana, la correcta relación entre los seres humanos y el Creador, y entre ellos mismos, y de los valores morales que inspiran y gobiernan la vida de las personas. Sólo surgen aparentes contradicciones cuando la ciencia o la religión —con frecuencia, ambas— cruzan sus límites y se entrometen indebidamente en los asuntos de la otra.

La ciencia es una forma de conocimiento, pero no es la única. El conocimiento también procede de otras fuentes. La experiencia común, la literatura imaginativa, el arte y la historia proporcionan un conocimiento válido del mundo, al igual que lo hacen la revelación y la religión para las personas de fe. El significado del mundo y de la vida humana, así como los asuntos relativos a los valores morales o religiosos, trascienden la ciencia. Sin embargo, son cuestiones importantes; para la mayoría de nosotros, son al menos tan importantes como el conocimiento científico *per se.*

Para la gente de fe, la relación adecuada entre ciencia y religión puede ser motivadora e inspiradora. La ciencia podría inspirar las creencias religiosas y el comportamiento religioso, ya que responde con respeto a la inmensidad del universo, a la magnífica variedad y admirable adaptación de los organismos, y a las maravillas del cerebro y la mente humana. La religión fomenta la reverencia hacia la creación y la humanidad, así como hacia el mundo viviente y su entorno. Para los científicos y para otras personas, la religión suele ser una fuerza estimulante y una fuente de inspiración para investigar el maravilloso mundo de la creación y resolver los rompecabezas a los que nos enfrenta.

Para algunos cristianos, la teoría de la evolución parece incompatible con sus creencias religiosas porque es incoherente con el relato bíblico de la creación. Los primeros capítulos del libro del Génesis describen cómo Dios creó el mundo, las plantas, los animales y los

seres humanos. Una interpretación literal del Génesis parece incompatible con la evolución progresiva de la vida humana y otros organismos a través de procesos naturales.

Incluso en el siglo XIX, poco después de que Darwin publicara *El origen de las especies,* algunos teólogos cristianos vieron una solución a la aparente contradicción entre la evolución y la creación, argumentando que Dios opera a través de causas intermedias. El origen y el movimiento de los planetas podía explicarse por la ley de la gravedad y otros procesos naturales sin negar la creación y la providencia de Dios. De la misma manera, la evolución podría considerarse como un proceso natural a través del cual Dios dotó de existencia a los seres vivos y los desarrolló según su plan. A. H. Strong, el presidente del Rochester Theological Seminary, del estado de Nueva York, escribió en su obra de 1885, *Systematic Theology*: «Aceptamos el principio de la evolución, pero lo consideramos únicamente como el método de la inteligencia divina». Explica que el primitivo ancestro de los comienzos humanos no es incompatible con su glorioso estatus de criatura hecha a imagen de Dios.

Poco a poco, ya en el siglo XX, la evolución acabó siendo aceptada por la mayoría de los escritores cristianos. El papa Pío XII, en su encíclica de 1950, *Humani Generis* (de la raza humana), afirmó que la evolución biológica era compatible con la fe cristiana. El papa Juan Pablo II, en una carta a la Academia Pontificia de las

Ciencias, el 22 de octubre de 1996, dijo: «Nuevos conocimientos llevan a pensar que la teoría de la evolución es más que una hipótesis. En efecto, es notable que esta teoría se haya impuesto paulatinamente al espíritu de los investigadores, a causa de una serie de descubrimientos hechos en diversas disciplinas del saber. La convergencia, de ningún modo buscada o provocada, de los resultados de trabajos realizados independientemente unos de otros, constituye de suyo un argumento significativo en favor de esta teoría».

La compatibilidad de la evolución con la fe cristiana también fue afirmada por otras denominaciones religiosas tradicionales. La Asamblea General de la United Presbyterian Church de Estados Unidos, adoptó, en 1982, una resolución que establecía que «los estudiosos religiosos y las escuelas teológicas (...) consideran que la teoría científica de la evolución no está en conflicto con las interpretaciones del origen de la vida halladas en la literatura bíblica». En 1965, la Federación Luterana Mundial afirmó que «las conjeturas de la evolución nos rodean tanto como el aire que respiramos y no podemos eludirlas. (...) Tanto la ciencia como la religión están aquí para quedarse, y (...) tienen que permanecer en una tensión saludable de respeto la una hacia la otra».

Las autoridades judías y los líderes de otras religiones importantes han emitido declaraciones similares. En 1984, la 95.ª Convención Anual de la Conferencia Central de Rabinos Norteamericanos adoptó una resolución que declaraba: «Considerando que los principios y conceptos de la evolución biológica son básicos para comprender la ciencia (...) hacemos un llamamiento a los profesores de ciencias y a las autoridades académicas locales de todos los Estados para reclamar libros de texto de calidad, basados en un conocimiento científico moderno y que excluyan el creacionismo "científico"».

El *Clergy Letter Project* (Proyecto de la Carta al Clero), firmado por más de doce mil miembros del clero cristiano de Estados Unidos, establece algo similar: «Nosotros, los abajo firmantes, el clero cristiano de muchas tradiciones diferentes, creemos que las verdades eternas de la Biblia y los descubrimientos de la ciencia moderna pueden coexistir cómodamente. Creemos que la teoría de la evolución es una verdad científica fundamental, construida con un escrutinio riguroso y sobre la que descansan muchos logros y conocimientos científicos. Rechazar esta teoría o tratarla como "una teoría más" significa abrazar deliberadamente la ignorancia y transmitir dicha ignorancia a nuestros hijos. Pedimos que la ciencia permanezca como ciencia y la religión como religión, dos formas de verdad muy diferentes pero complementarias».

Una dificultad que surge al atribuir el diseño de los organismos al Creador es que las imperfecciones y defectos se extienden a todo el mundo viviente. Pensemos en el ojo humano. Las fibras nerviosas visuales del ojo convergen para formar el nervio óptico que atra-

viesa la retina (para llegar al cerebro) y de esta manera crea un punto ciego, una imperfección menor pero, en todo caso, una imperfección del diseño; los calamares y los pulpos no tienen este defecto. ¿El Creador sentía más amor hacia los calamares que hacia los seres humanos y por ello tuvo más cuidado al diseñar sus ojos que los nuestros? Pensemos ahora en la mandíbula humana. Tenemos demasiados dientes para el tamaño de nuestra mandíbula; por este motivo tienen que extraernos la muela del juicio y los ortodoncistas pueden ganarse la vida decentemente enderezando el resto de los dientes. ¿Podemos culpar a Dios por este error? Un ingeniero humano lo habría hecho mejor. La evolución proporciona una buena explicación para estas imperfecciones.

Los ejemplos de deficiencias y disfunciones en todo tipo de organismos pueden multiplicarse hasta el infinito. El mundo de los organismos también tiene abundantes características que, como en la conducta de depredadores que matan y devoran a sus presas, podrían denominarse *crueldades*, un calificativo apropiado si las conductas crueles fueran el resultado del diseño de un ser sujeto a patrones morales humanos o superiores. Sin embargo, esas crueldades sólo son metafóricas cuando se aplican al efecto de la selección natural o a los animales, ya que éstos carecen de estatus moral.

En el pasado, los estudiosos de las religiones lucharon con la imperfección, la disfunción y la crueldad del mundo viviente, difíciles de explicar si son el resultado

del diseño de Dios. El filósofo escocés David Hume (1711-1776) planteó el problema sucintamente y con una franqueza brutal: «¿Es que [Dios] quiere prevenir la maldad, pero no es capaz? Entonces sería impotente. ¿Es capaz, pero no desea hacerlo? Entonces sería malévolo. ¿Es capaz y desea hacerlo? ¿De dónde surge entonces la maldad?». La evolución viene al rescate. Como dijo el teólogo Aubrey Moore, en 1891, «Apareció el darwinismo y, bajo el aspecto de un enemigo, hizo el trabajo de un amigo». La teoría de la evolución, que en un primer momento parece que acabó con la necesidad de Dios en el mundo, ahora ha acabado convincentemente con la necesidad de explicar las imperfecciones del mundo como resultados fallidos del diseño de Dios.

Si afirmamos que los organismos y sus componentes han sido específicamente diseñados por Dios, tenemos que explicar el incompetente diseño de la mandíbula humana, la estrechez del conducto para el nacimiento y el pobre diseño de nuestra columna vertebral (que no es precisamente de lo más idónea para mantenernos derechos al andar). Las personas de fe harían bien en admitir la revolución de Darwin y aceptar la selección natural como el proceso que explica el diseño de los organismos, así como las disfunciones, las rarezas y las crueldades que impregnan el mundo de la vida. La evolución permite atribuir esos accidentes a procesos naturales (que carecen de implicaciones morales), en lugar de achacarlos a la creación directa o al diseño específico del Creador.

La evolución podría contribuir a una posible explicación teológica de los defectos, las disfunciones, el canibalismo, el parasitismo, la depredación y otras *maldades* del mundo. Algunos autores antirreligiosos, así como otros críticos, han argumentado que el proceso de la evolución por selección natural no libera a Dios de su responsabilidad respecto a las disfunciones y crueldades del mundo viviente porque, para la gente de fe, Dios es el Creador del universo y, por tanto, sería responsable de sus consecuencias, directas o indirectas, inmediatas o mediatas. Según este argumento, si Dios es omnipotente, podría haber creado un mundo donde no pudieran ocurrir cosas como la crueldad, el parasitismo y los abortos humanos.

Una respuesta posible es afirmar que los actos divinos son inescrutables y que los humanos no están facultados para buscar el significado de los propósitos de Dios, ni mucho menos para pedirle cuentas de sus actos. Para muchos, esta respuesta es insatisfactoria porque simplemente evade la cuestión en lugar de responderla. A continuación mostramos otra posible explicación. En primer lugar, pensemos en los seres humanos, que realizan todo tipo de delitos y pecados, incluso el perjurio, el adulterio y el asesinato. La gente de fe cree que cada ser humano es una creación de Dios, pero esto no implica que Dios sea responsable de los crímenes humanos y las ofensas. El pecado es consecuencia del libre albedrío; la otra cara del pecado es la virtud. Los teólogos cristianos han expuesto que si los humanos quieren llegar a tener una relación genuinamente personal

con su creador, primero deben experimentar cierto grado de libertad. La eterna recompensa del cielo exige una vida virtuosa. La crítica podrían decir que esta explicación no excusa a Dios, porque Dios podría haber creado humanos sin libre albedrío (aunque su nombre fuera otro que el de *humanos*, fuera cual fuere su apariencia). Sin embargo, como es lógico, se podría argumentar que esos *humanos* sin libre albedrío habrían sido unas criaturas muy diferentes, unos seres mucho menos interesantes y creativos que los humanos. Los robots no son buenos sustitutos de los humanos; los robots no realizan acciones virtuosas.

Antes de que surgiera la ciencia física moderna, desde la perspectiva de algunas religiones, Dios causaba la lluvia, la sequía, los terremotos y las erupciones volcánicas para recompensar o castigar a las personas. Esta perspectiva implica que Dios causó el tsunami que mató a 200 000 indonesios hace pocos años. Esto resultaría incompatible con un Dios benevolente. Sin embargo, hoy día sabemos que los tsunamis y otras catástrofes naturales ocurren por procesos naturales. Los procesos naturales no implican valores morales. La crítica podría objetar que Dios podía haber creado un mundo diferente, sin catástrofes. Está claro que, de acuerdo con algunos sistemas de creencias, Dios podía haber creado un mundo diferente. Pero ese mundo no sería un universo creativo en el que se forman galaxias, surgen estrellas y sistemas planetarios, y los continentes van a la deriva. El mundo que tenemos es creativo y es más emocionante que un mundo estático.

Volvamos de nuevo al fallido diseño de la mandíbula humana, a los parásitos que matan a millones de niños y al sistema reproductor humano, tan pobremente diseñado, que ocasiona millones de abortos cada año en el mundo. Si estos espantosos sucesos ocurrieran por el diseño directo de Dios, éste sería responsable de sus consecuencias. Si los ingenieros diseñaran coches que explotasen al introducir la llave de encendido, serían responsables. Pero si estos espantosos sucesos surgen por la evolución o por otros procesos naturales, las implicaciones morales desaparecen porque los procesos naturales no implican valores morales. De nuevo, se podría objetar que Dios es definitivamente responsable porque Dios pudo haber creado un mundo sin crueldades, parásitos o disfunciones. Sin embargo, un mundo de vida con evolución es mucho más interesante; es un mundo creativo en el que surgen nuevas especies, aparecen complejos ecosistemas y los seres humanos evolucionan. Este relato no satisfará a algunas personas de fe, y seguramente muchos incrédulos lo encontrarán poco convincente. Pero lo que sugiero es que podría ser el comienzo de una explicación para mucha gente de fe.

Algunos cristianos se oponen a aceptar la evolución, concretamente la evolución humana, porque sostienen una interpretación literal de la Biblia. Según la Declaración de Creencia de la Creation Research Society (Sociedad de Investigación de la Creación) fundada en 1963, «La Biblia es la Palabra Escrita de Dios, y como está inspirada en ella, todas sus afirmaciones son verdaderas histórica y científicamente en el autógrafo original. Para el estudioso de la naturaleza, esto significa que el relato de los orígenes del Génesis es una presentación objetiva de simples verdades históricas».

Muchos estudiosos de la Biblia y teólogos han rechazado desde hace tiempo una interpretación literal de la Biblia por considerarla insostenible, ya que contiene declaraciones incompatibles entre sí. En el principio mismo del libro del Génesis se presentan dos relatos diferentes de la creación. A lo largo de todo el primer capítulo, y en los primeros versos del capítulo 2, llegamos al sexto día de la creación, cuando Dios crea a los seres humanos (hombre y mujer) a su imagen y semejanza, tras haber creado la luz, la tierra, el firmamento, los peces, las aves de corral y el ganado. En el versículo 4 del capítulo 2 empieza un relato diferente, en el que Dios crea al hombre, luego planta un jardín y crea a los animales, y sólo después procede a extraer la costilla del hombre para crear a la mujer.

¿Cuál de los dos relatos es el correcto y cuál es un error? Yo diría que no se contradicen si entendemos que los dos relatos portan el mismo mensaje, es decir, que el mundo fue creado por Dios y que los humanos son sus criaturas. Sin embargo, me parece que ninguno de los dos relatos puede ser «verdadero, histórica y científicamente» como postulaba la Declaración de Creencia de la Sociedad de Investigación de la Creación.

Muchas partes de la Biblia están llenas de incoherencias y contradicciones; por ejemplo, en la descripción

que hace del retorno del pueblo elegido de Israel a la Tierra Prometida desde Egipto; por no mencionar afirmaciones erróneas sobre la rotación del Sol alrededor de la Tierra y otras cosas por el estilo. Los estudiosos de la Biblia señalan que en ella no hay errores respecto a la verdad religiosa, no en asuntos que tengan importancia para la salvación. De esta manera, san Agustín (354-430), uno de los mayores teólogos cristianos de todos los tiempos, escribió en su *De Genesi ad litteram* (Comentario Literal del Génesis): «Frecuentemente preguntamos acerca de la forma del cielo, de acuerdo con las Sagradas Escrituras. (...) Tales asuntos no son de utilidad para aquéllos que buscan la beatitud. Y, lo que es peor, usan tiempo muy precioso que debiera ser dado a lo que es espiritualmente beneficioso para la salvación». Este aspecto ya lo habían señalado anteriormente otros padres de la Iglesia. San Agustín añadió: «En el asunto de la forma del cielo, los escritores sagrados no desean enseñar a los hombres hechos que podrían ser inútiles para su salvación». Es decir, el libro del Génesis no es un libro elemental de astronomía. San Agustín también observó que en el relato del Génesis sobre la creación, Dios crea la luz el primer día pero no crea el sol hasta el cuarto día. San Agustín concluyó que la *luz* y los *días* en el Génesis no tienen un sentido literal. La Biblia trata de religión y no es el propósito de los autores religiosos de la Biblia establecer cuestiones científicas.

Han seguido apareciendo declaraciones similares de autoridades religiosas, incluida la citada anteriormen-

te, hasta el presente. En 1981, Juan Pablo II afirmó que la propia Biblia «nos habla de los orígenes del universo y su creación no para aportarnos un tratado científico sino para establecer la correcta relación de los hombres con Dios y con el universo. Las Sagradas Escrituras desean simplemente declarar que el mundo fue creado por Dios. (...) Y otra enseñanza sobre el origen y la creación del universo es ajena a las intenciones de la Biblia, que no desea enseñarnos cómo se creó el cielo sino cómo se va al cielo».

Para concluir, mi respuesta es la siguiente: «Sí, se puede creer tanto en la evolución como en Dios». La evolución es una teoría científica bien corroborada. Los cristianos y otra gente de fe no tienen por qué ver la evolución como una amenaza a sus creencias. Muchos teólogos y otras personas de fe ven la evolución como el proceso por el que Dios crea la maravillosa diversidad del mundo vivo. Por tanto, yo añadiría, parafraseando al teólogo Aubrey Moore, que la evolución no es la enemiga de la religión sino, más bien, su amiga.

Nota bibliográfica

La analogía del capítulo 5 entre el sistema de transportes en Estados Unidos y los caminos metabólicos de una célula se ha tomado prestada de James Trefil, Harold J. Morowitz y Eric Smith, «The Origin of Life», *American Scientist*, 97 (2009), pp. 206-213. Para evidencias más recientes sobre las moléculas de ARN como catalizadoras (ribosomas), véase Saba Valadkhan, Afshin Mohammadi, Yasaman Jaladat y Sarah Geisler, «Protein-Free Small Nuclear RNAs Catalyze a Two-Step Splicing Reaction», *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 106 (2009), pp. 11901-11906; y Samuel E. Butcher, «The Spliceosome as Ribozyme Hypothesis Takes a Second Step», *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 106 (2009), pp. 12211-12212. Para los experimentos que muestran cómo pudo surgir espontáneamente la información codificada en los ácidos nucleicos, véase Jack W. Szostak, «Systems Chemistry on Early Earth», *Nature*, 459 (2009), pp. 171-172; y Matthew W. Powner, Béatrice Gerland y John D. Sutherland, «Synthesis of Activated Pyrimidine Ribonucleotides in Prebiotically Plausible Conditions», *Nature*,

459 (2009), pp. 239-242. Para información adicional sobre los temas tratados en los capítulos 1 a 4 y el capítulo 6, véase Francisco J. Ayala, *Darwin's Gift to Science and Religion*, Joseph Henry Press, 2007. [Hay trad. cast.: *Darwin y el diseño inteligente: creacionismo, cristianismo y evolución*, Alianza Editorial, Madrid, 2010.] Se puede encontrar un estudio más profundo y extenso sobre los orígenes humanos en Camilo J. Cela-Conde y Francisco J. Ayala, *Human Evolution: Trails from the Past*, Oxford University Press, 2007. [Hay trad. cast.: *Senderos de la evolución humana*, Alianza Editorial, Madrid, 2009.]